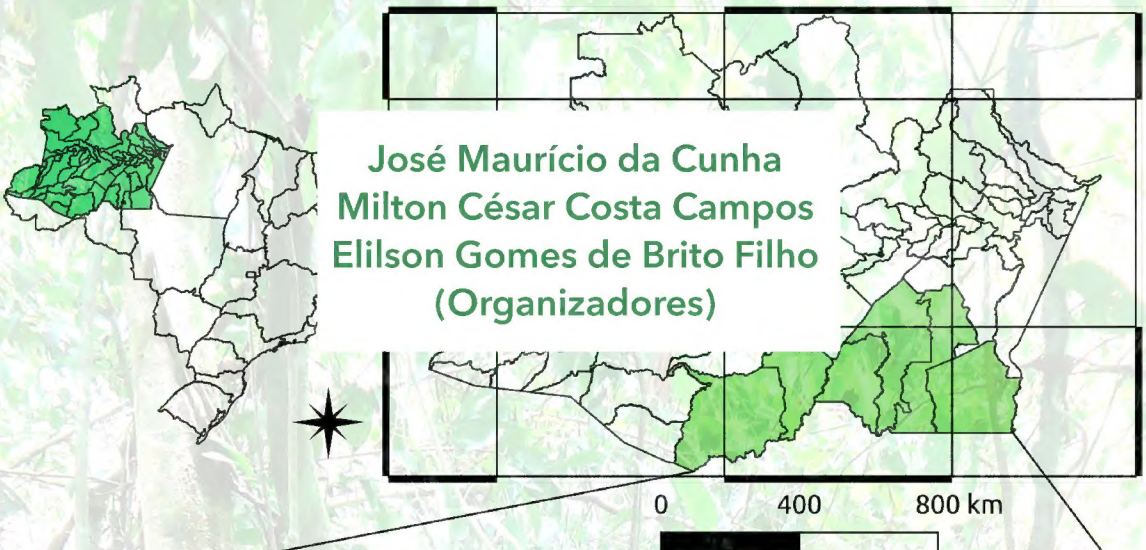
# TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA:

## Atributos morfológicos, físicos, químicos e efluxo de CO2 em solos sob diferentes usos na região Sul do Amazonas

José Maurício da Cunha
Milton César Costa Campos
Elilson Gomes de Brito Filho
(Organizadores)

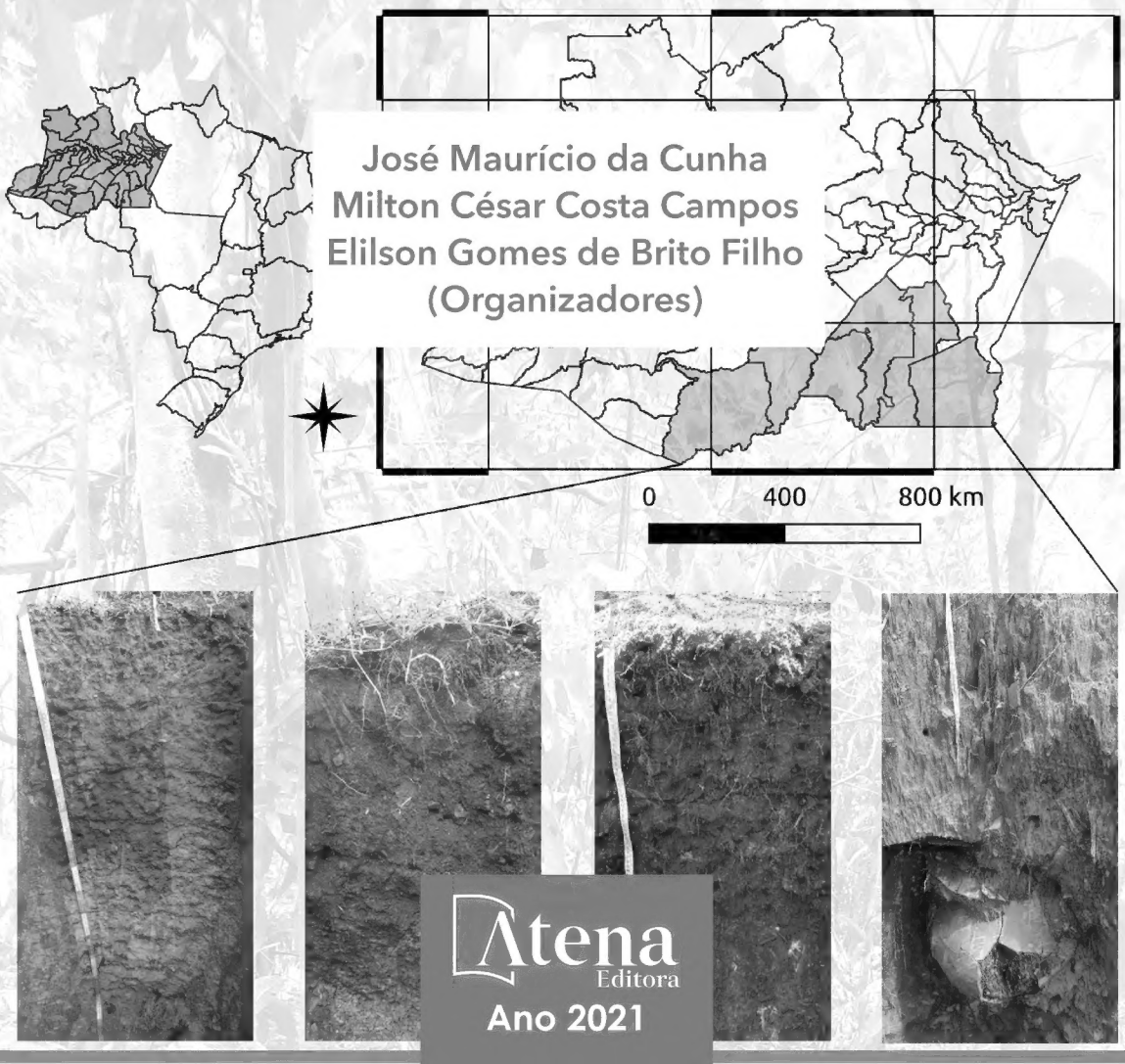


Atena Editora
Ano 2021

# TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA:

## Atributos morfológicos, físicos, químicos e efluxo de CO2 em solos sob diferentes usos na região Sul do Amazonas

José Maurício da Cunha
Milton César Costa Campos
Elilson Gomes de Brito Filho
(Organizadores)




Atena Editora
Ano 2021

**Editora Chefe**
Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
**Assistentes Editoriais**
Natalia Oliveira
Bruno Oliveira
Flávia Roberta Barão
**Bibliotecária**
Janaina Ramos
**Projeto Gráfico e Diagramação**
Natália Sandrini de Azevedo
Camila Alves de Cremo
Luiza Alves Batista
Maria Alice Pinheiro
**Imagens da Capa**
Shutterstock
**Edição de Arte**
Luiza Alves Batista
**Revisão**
Os Autores

2021 *by Atena Editora*
*Copyright* © Atena Editora
*Copyright* do texto © 2021 Os autores
*Copyright* da edição © 2021 Atena Editora
Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.
*Open access publication by* Atena Editora.

Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial**
**Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**
Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Prof. Dr. Américo Junior Nunes da Silva – Universidade do Estado da Bahia
Profª Drª Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

Atena Editora
Ano 2021

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Arnaldo Oliveira Souza Júnior – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Daniel Richard Sant'Ana – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Dilma Antunes Silva – Universidade Federal de São Paulo
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Elson Ferreira Costa – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros
Prof. Dr. Humberto Costa – Universidade Federal do Paraná
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. José Luis Montesillo-Cedillo – Universidad Autónoma del Estado de México
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Profª Drª Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Miguel Rodrigues Netto – Universidade do Estado de Mato Grosso
Prof. Dr.Pablo Ricardo de Lima Falcão – Universidade de Pernambuco
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Ribeiro Simon Cavalcanti – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

**Ciências Agrárias e Multidisciplinar**
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Profª Drª Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Jayme Augusto Peres – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro



Atena Editora
Ano 2021

Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

**Ciências Biológicas e da Saúde**
Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Débora Luana Ribeiro Pessoa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Douglas Siqueira de Almeida Chaves – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Fernanda Miguel de Andrade – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Helio Franklin Rodrigues de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Jefferson Thiago Souza – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Jesus Rodrigues Lemos – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Jônatas de França Barros – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federacl do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Vanessa da Fontoura Custódio Monteiro – Universidade do Vale do Sapucaí
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Welma Emidio da Silva – Universidade Federal Rural de Pernambuco

**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**
Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
ProFª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

**Linguística, Letras e Artes**
Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro
Profª Drª Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Edna Alencar da Silva Rivera – Instituto Federal de São Paulo
Profª DrªFernanda Tonelli – Instituto Federal de São Paulo,
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

**Conselho Técnico científico**
Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí
Profª Ma. Adriana Regina Vettorazzi Schmitt – Instituto Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais
Prof. Me. Alexsandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
Profª Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Profª Drª Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia
Profª Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá
Profª Ma. Anne Karynne da Silva Barbosa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais
Prof. Me. Armando Dias Duarte – Universidade Federal de Pernambuco
Profª Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
Profª Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Me. Carlos Augusto Zilli – Instituto Federal de Santa Catarina
Prof. Me. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná
Profª Drª Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª Drª Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas
Prof. Me. Clécio Danilo Dias da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará

Profª Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília
Profª Ma. Daniela Remião de Macedo – Universidade de Lisboa
Profª Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás
Prof. Me. Edevaldo de Castro Monteiro – Embrapa Agrobiologia
Prof. Me. Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases
Prof. Me. Eduardo Henrique Ferreira – Faculdade Pitágoras de Londrina
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Prof. Me. Ernane Rosa Martins – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes – Instituto Edith Theresa Hedwing Stein
Prof. Me. Ezequiel Martins Ferreira – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora
Prof. Me. Fabiano Eloy Atílio Batista – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas
Prof. Me. Francisco Odécio Sales – Instituto Federal do Ceará
Prof. Me. Francisco Sérgio Lopes Vasconcelos Filho – Universidade Federal do Cariri
Profª Drª Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
Prof. Me. Givanildo de Oliveira Santos – Secretaria da Educação de Goiás
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro
Profª Ma. Isabelle Cerqueira Sousa – Universidade de Fortaleza
Profª Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará
Prof. Dr. José Carlos da Silva Mendes – Instituto de Psicologia Cognitiva, Desenvolvimento Humano e Social
Prof. Me. Jose Elyton Batista dos Santos – Universidade Federal de Sergipe
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco
Profª Drª Juliana Santana de Curcio – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFPA
Prof. Dr. Kárpio Márcio de Siqueira – Universidade do Estado da Bahia
Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis
Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenologia & Subjetividade/UFPR
Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Ma. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
Profª Ma. Lilian de Souza – Faculdade de Tecnologia de Itu
Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
Profª Drª Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe
Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná
Profª Ma. Luana Ferreira dos Santos – Universidade Estadual de Santa Cruz
Profª Ma. Luana Vieira Toledo – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof. Me. Luiz Renato da Silva Rocha – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª Ma. Luma Sarai de Oliveira – Universidade Estadual de Campinas
Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos

Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva – Governo do Estado do Espírito Santo
Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior
Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
Prof. Me. Marcos Roberto Gregolin – Agência de Desenvolvimento Regional do Extremo Oeste do Paraná
Profª Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará
Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Prof. Dr. Pedro Henrique Abreu Moura – Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais
Prof. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Profª Drª Poliana Arruda Fajardo – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Rafael Cunha Ferro – Universidade Anhembi Morumbi
Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Renan Monteiro do Nascimento – Universidade de Brasília
Prof. Me. Renato Faria da Gama – Instituto Gama – Medicina Personalizada e Integrativa
Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
Prof. Me. Robson Lucas Soares da Silva – Universidade Federal da Paraíba
Prof. Me. Sebastião André Barbosa Junior – Universidade Federal Rural de Pernambuco
Profª Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão
Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
Prof. Dr. Sulivan Pereira Dantas – Prefeitura Municipal de Fortaleza
Profª Ma. Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Universidade Estadual do Ceará
Profª Ma. Thatianny Jasmine Castro Martins de Carvalho – Universidade Federal do Piauí
Prof. Me. Tiago Silvio Dedoné – Colégio ECEL Positivo
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Ciências Agrárias

Atena Editora
Ano 2021

# Terra Preta Arqueológica: atributos morfológicos, físicos, químicos e efluxo de CO2 em solos sob diferentes usos na região sul do Amazonas

**Bibliotecária:** Janaina Ramos
**Diagramação:** Camila Alves de Cremo
**Correção:** Flávia Roberta Barão
**Edição de Arte:** Luiza Alves Batista
**Revisão:** Os autores
**Organizadores:** José Maurício da Cunha
Milton César Costa Campos
Elilson Gomes de Brito Filho

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

T323 Terra Preta Arqueológica: atributos morfológicos, físicos, químicos e efluxo de CO2 em solos sob diferentes usos na região sul do Amazonas / Organizadores José Maurício da Cunha, Milton César Costa Campos, Elilson Gomes de Brito Filho. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-5983-220-0
DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.200210707

1. Solos amazônicos. 2. Solos antrópicos. I. Cunha, José Maurício da (Organizador). II. Campos, Milton César Costa (Organizador). III. Brito Filho, Elilson Gomes de (Organizador). IV. Título.

CDD 631.409811

**Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166**

**Atena Editora**
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

Atena Editora
Ano 2021

Ciências Agrárias

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access, desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce,* ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou permite a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

Ciências Agrárias

Atena
Editora
Ano 2021

# APRESENTAÇÃO

A ocorrência de manchas de solos alterados e/ou formadas por populações pré-colombianas no ambiente amazônico são conhecidas como Terras Pretas Arqueológicas, Terra Preta de Índio, Terra Preta Antropogênica e Terra Mulata. A fertilidade e resiliência desses solos, não só atraem agricultores locais, mas também cientistas que buscam entender como esses solos se formaram e como o conhecimento sobre eles pode ajudar a maior produtividade e sustentabilidade dos solos tropicais. Os solos antropogênicos amazônicos têm sido alvo de diversos estudos, com destaque para aqueles voltados a entender as origens das Terras Pretas de Índio, mas até o momento sua origem é controversa entre os pesquisadores. Diversas hipóteses têm sido sugeridas para a formação destas unidades pedológicas, a mais aceita é que o homem pré-colombiano os formou de forma não intencional.

As Terras Pretas de Índio (TPI) são caracterizadas por apresentarem horizonte A antropogênico e ocorrem em antigos assentamentos contendo artefatos culturais, como fragmentos de cerâmica, e sua coloração escura resulta do acúmulo de matéria orgânica decomposta na forma de carbono pirogênico como resíduo de incêndios domésticos e queima por uso da terra agrícola. Esses solos podem ocorrer em vários tipos de solo, especialmente Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Neossolos. Estes solos ocorrem em pontos descontínuos em toda a região amazônica, particularmente no Brasil, Colômbia, Guiana, Equador, Peru e Venezuela e as manchas de solo têm tamanhos que variam de um a 500 hectares, mas a maioria (cerca de 80%) tem tamanhos de dois a cinco hectares. Geralmente estão distribuídos em elevações marginais, posição topográfica que permite boa visibilidade em seu entorno, próximo a cursos d'água, que podem ser de águas claras de cor branca ou preta. Diante disso, o presente trabalho aborda uma síntese de temas relacionados aos estudos das Terras Pretas de Índio, contribuindo com a comunidade científica em geral para a divulgação de estudos em solos antrópicos amazônicos, além de difundir junto à comunidade local a importância do uso adequado do solo da região, de forma que possa usufruir de seus benefícios de maneira sustentável.

Dessa forma, apresenta-se a coletânea de trabalhos elaborado por trinta e um pesquisadores da área distribuídos em quinze capítulos, neste consta aspectos da pedogênse, caracterização dos atributos, classificação dos solos e uso e manejo das Terras Pretas de Índio na Amazônia brasileira. Além disso, relaciona os atributos físicos, químicos e morfológicos dos solos sob TPI em comparação às diversas coberturas vegetais regionais. Acrescenta-se ainda que nestes capítulos, encontram-se estudos de caracterizações dos atributos, bem como o uso de ferramentas de análises de comparação dos atributos das TPI's, como a geoestatística, estatística univariada e multivariada, sendo a primeira uma ferramenta muito útil para o mapeamento digital de solos, mostrando a

importância da mesma no estudo da distribuição espacial dos atributos como forma de validação qualitativa dos métodos.

Destaca-se que ao sintetizar as ideias de cada tema, este trabalho se torna um instrumento de base para os alunos de graduação, pós-graduação e pesquisadores de áreas multidisciplinares, além de produtores rurais local e regional, haja vistas que apresenta uma perspectiva diagnóstica das Terras Pretas de Índio da Amazônia, a fim de que possa contribuir na orientação e tomada de decisão junto a essas comunidades. Para cada tema, há uma introdução inicial que justifica o estado da arte para as pesquisas em áreas de Terras Pretas de Índio, dando relevância às atividades relacionada tanto às caracterizações do solo, quanto ao uso e manejo adequado do solo. É importante destacar que este documento não tem como único fim ilustrar aspectos ligados a gênese das TPI's e a importância do uso e manejo adequado do solo. Mas como está escrito em linguagem de fácil compreensão, ele também é voltado para alunos de ensino médio que podem se confrontar com o desejo de atuar na área de Ciências Ambientais e Agronômicas.

Agradecemos à Pro-reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPESP) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), que apoiou a realização deste livro através do EDITAL no 24/2020 – PROPESP/UFAM: PROGRAMA DE APOIO À PUBLICAÇÃO DE LIVROS – 2020, no projeto "***CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS ANTRÓPICOS E NÃO ANTRÓPICOS N***A REGIÃO SUL-SUDESTE DO AMAZONAS.

".

## SUMÁRIO

**CAPÍTULO 1** ..... 1

CARACTERIZAÇÃO E GÊNESE DE TERRAS PRETAS ARQUEOLÓGICAS NO SUL DO ESTADO DO AMAZONAS

Luís Antônio Coutrim dos Santos
Milton César Costa Campos
Renato Eleotério de Aquino
Anderson Cristian Bergamin
Douglas Marcelo Pinheiro da Silva
José Maurício da Cunha

**DOI 10.22533/at.ed.2002107071**

**CAPÍTULO 2** ..... 20

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DE TERRAS PRETAS ARQUEOLÓGICAS E DE SOLOS NÃO ANTROPOGÊNICOS NA REGIÃO DE MANICORÉ, AM

Milton César Costa Campos
Luís Antônio Coutrim dos Santos
Douglas Marcelo Pinheiro da Silva
Bruno Campos Mantovanelli
Marcelo Dayron Rodrigues Soares
José Maurício da Cunha

**DOI 10.22533/at.ed.2002107072**

**CAPÍTULO 3** ..... 33

VARIAÇÃO ESPACIAL DA ESTABILIDADE DOS AGREGADOS E ESTOQUE DE CARBONO EM ÁREA DE TERRA PRETA ARQUEOLOGICA SOB CULTIVO DE CACAU

Douglas Marcelo Pinheiro da Silva
Milton César Costa Campos
Leandro Coutinho Alho
José Maurício da Cunha
Bruno Campos Mantovanelli

**DOI 10.22533/at.ed.2002107073**

**CAPÍTULO 4** ..... 46

EMISSÃO DE $CO_2$ DO SOLO EM ÁREAS DE TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA NA REGIÃO AMAZÔNICA

José Maurício da Cunha
Milton César Costa Campos
Denilton Carlos Gaio
Zigomar Menezes de Souza
Marcelo Dayron Rodrigues Soares
Douglas Marcelo Pinheiro da Silva
Emily Lira Simões

**DOI 10.22533/at.ed.2002107074**

**CAPÍTULO 5** ..... **67**

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO EFLUXO DE $CO_2$ EM ÁREA DE TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA SOB CULTIVO DE CACAU E CAFÉ NO MUNICÍPIO DE APUÍ, AM

Milton César Costa Campos
Leandro Coutinho Alho
Marcelo Dayron Rodrigues Soares
Diogo André Pinheiro da Silva
José Maurício da Cunha
Douglas Marcelo Pinheiro da Silva

**DOI 10.22533/at.ed.2002107075**

**CAPÍTULO 6** ..... **80**

VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM ÁREA DE TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA SOB PASTAGEM EM MANICORÉ, AM

Marcelo Dayron Rodrigues Soares
Milton César Costa Campos
Zigomar Menezes de Souza
Wildson Benedito Mendes Brito
José Mauricio da Cunha

**DOI 10.22533/at.ed.2002107076**

**CAPÍTULO 7** ..... **93**

VARIABILIDADE ESPACIAL DO ESTOQUE DE CARBONO E ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA SOB PASTAGEM

Marcelo Dayron Rodrigues Soares
Milton César Costa Campos
José Maurício da Cunha
Zigomar Menezes de Souza
Ivanildo Amorim de Oliveira
Renato Eleotério de Aquino
Bruno Campos Mantovanelli

**DOI 10.22533/at.ed.2002107077**

**CAPÍTULO 8** ..... **106**

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM TERRA PRETA DE ÍNDIO SOB CULTIVO DE CAFÉ CONILON

Pedro Cardoso Mota Júnior
Milton César Costa Campos
Bruno Campos Mantovanelli
Uilson Franciscon
José Mauricio da Cunha

**DOI 10.22533/at.ed.2002107078**

**CAPÍTULO 9** ..... **122**

ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E ESTOQUE DE CARBONO EM ÁREAS DE TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA SOB PASTAGEM E FEIJÃO GUANDU EM NOVO ARIPUANÃ, AM

José Maurício da Cunha

Denilton Carlos Gaio
Milton César Costa Campos
Marcelo Dayron Rodrigues Soares
Douglas Marcelo Pinheiro da Silva
Alan Ferreira Leite de Lima
**DOI 10.22533/at.ed.2002107079**

**CAPÍTULO 10 ..... 144**

VARIABILIDADE ESPACIAL DA TEXTURA DO SOLO EM ÁREA DE TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA SOB DIFERENTES USOS NA REGIÃO SUL DO AMAZONAS
Elilson Gomes de Brito Filho
Bruno Campos Mantovanelli
Wildson Benedito Mendes Brito
Julimar Fonseca da Silva
Milton César Costa Campos
José Maurício da Cunha
**DOI 10.22533/at.ed.20021070710**

**CAPÍTULO 11 ..... 153**

VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO EM ÁREA DE TERRA PRETA ARQUEOLOGICA SOB CULTIVO DE CACAU EM APUÍ, AM
Douglas Marcelo Pinheiro da Silva
Milton César Costa Campos
Uilson Franciscon
Leandro Coutinho Alho
Zigomar Menezes de Souza
José Maurício da Cunha
Anderson Cristian Bergamin
**DOI 10.22533/at.ed.20021070711**

**CAPÍTULO 12 ..... 173**

SPATIAL VARIABILITY OF AGGREGATES AND ORGANIC CARBON UNDER THREE DIFFERENT USES OF INDIAN BLACK EARTH IN SOUTHERN AMAZONAS
Romário Pimenta Gomes
Milton César Costa Campos
Marcelo Dayron Rodrigues Soares
Douglas Marcelo Pinheiro Silva
José Maurício Cunha
Uilson Franciscon
Laercio Santos Silva
Ivanildo Amorim Oliveira
Wildson Benedito Mendes Brito
**DOI 10.22533/at.ed.20021070712**

**CAPÍTULO 13 ..... 187**

FRACTAL FEATURES OF SOIL TEXTURE AND PHYSICAL ATTRIBUTES IN ARCHAEOLOGICAL DARK EARTH UNDER DIFFERENT USES IN WESTERN AMAZON
Half Weinberg Corrêa Jordão

Milton César Costa Campos
José Maurício da Cunha
Ivanildo Amorim de Oliveira
Laércio Santos Silva
Ludmila de Freitas
Romário Pimenta Gomes
Elilson Gomes de Brito Filho
Bruno Campos Mantovanelli
**DOI 10.22533/at.ed.20021070713**

**CAPÍTULO 14 ..... 206**

SPATIAL VARIATION OF CHEMICAL ATTRIBUTES IN ARCHAEOLOGICAL DARK EARTH UNDER COCOA CULTIVATION IN WESTERN AMAZON
Roneres Deniz Barbosa
Alan Ferreira Leite de Lima
Elilson Gomes de Brito Filho
Milton César Costa Campos
José Maurício da Cunha
Bruno Campos Mantovanelli
Douglas Marcelo Pinheiro da Silva
Fernando Gomes de Souza
**DOI 10.22533/at.ed.20021070714**

**CAPÍTULO 15 ..... 225**

VARIABILITY AND SPATIAL CORRELATION OF AGGREGATES AND ORGANIC CARBON IN INDIAN DARK EARTH IN APUÍ REGION, AM
Romário Pimenta Gomes
Milton César Costa Campos
Wildson Benedito Mendes Brito
José Maurício da Cunha
Laércio Santos Silva
Ivanildo Amorim Oliveira
Ludmila de Freitas
**DOI 10.22533/at.ed.20021070715**

**SOBRE OS ORGANIZADORES ..... 239**

# CAPÍTULO 1

# CARACTERIZAÇÃO E GÊNESE DE TERRAS PRETAS ARQUEOLÓGICAS NO SUL DO ESTADO DO AMAZONAS

*Data de aceite: 18/05/2021*

**Luís Antônio Coutrim dos Santos**
Universidade do Estado do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://lattes.cnpq.br/3309448267226921

**Milton César Costa Campos**
Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal da Paraíba
Areia - Paraíba
https://orcid.org/0000-0002-8183-7069

**Renato Eleotério de Aquino**
UNIC Educacional, UNIC, Brasil
Porto Velho - Rondônia
http://lattes.cnpq.br/5757582294404864

**Anderson Cristian Bergamin**
Universidade Federal de Rondônia, UNIR, Brasil
Rolim de Moura - Rondônia
http://lattes.cnpq.br/3961477986363222

**Douglas Marcelo Pinheiro da Silva**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://lattes.cnpq.br/6219916883682579

**José Maurício da Cunha**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://lattes.cnpq.br/3425545536495518

**RESUMO:** As Terras Pretas Arqueológicas (TPAs) são unidades de solo que apresentam como características alta fertilidade, coloração escura e presença de fragmentos cerâmicos. Sobre a formação das TPAs, a hipótese mais bem aceita entre os pesquisadores é que essas foram originadas a partir de processos antrópicos provocados pelos homens pré-colombianos. Diante disso, objetivou-se caracterizar TPAs localizadas nos municípios de Apuí e Manicoré, na região sul do Estado do Amazonas. Foram selecionados sete locais de ocorrência de TPAs, sendo abertas trincheiras e os perfis do solo caracterizados morfologicamente. Procedeu-se à coleta de amostras de solo em cada horizonte para as seguintes análises físicas e químicas: composição granulométrica, argila dispersa em água, grau de floculação, densidade do solo, densidade de partículas e porosidade total, pH em água e KCl, $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $K^{+}$ e $Al^{3+}$ trocáveis, P disponível, H+Al e C orgânico, além dos teores dos óxidos do ataque sulfúrico, óxidos livre e formas mal cristalizadas. A textura dos horizontes A antrópicos variaram de franco-arenosa a franco-argilosa. Os fragmentos cerâmicos e material lítico apresentaram-se em quantidades e profundidades semelhantes no horizonte A dos perfis estudados, sugerindo certa similaridade dos fatores antrópicos que promoveram sua formação. Os horizontes antrópicos dos perfis P3, P4 e P7 apresentaram caráter eutrófico e teores altos a muito altos de fósforo disponível, quando comparados aos perfis P1, P2, P5 e P6, evidenciando heterogeneidade das TPAs.

**PALAVRAS-CHAVE**: Pedogênese, solos amazônicos, solos antrópicos.

## CHARACTERIZATION OF ARCHAEOLOGICAL DARK EARTH FROM THE SOUTHERN AMAZON REGION

**ABSTRACT**: The Archaeological Dark Earth (ADE) soils are characterized by its high fertility, dark color, and presence of pottery fragments. Regarding the formation of ADE, the most widely accepted hypothesis is that anthropogenic processes involving pre-Columbian populations made them. The purpose of this study is to characterize ADE units located in the Southern Amazon Region, in the cities of Apuí and Manicoré. Seven ADE sites were selected, trenches opened and the soil profiles characterized morphologically. Then, samples of each horizon were collected for analyses of the following physical and chemical properties: particle size, water-dispersible clay, flocculation, soil bulk density, particle density, total porosity, pH in water and KCl solutions, Ca2+, Mg2+, K+, Al3+, available P, H+Al, and organic C. Also, total oxides, free oxides and amorphous forms were analyzed. The texture of the anthropic A horizon ranged from sandy loam to clay loam. The pottery fragments and lithic material were found in similar quantities and at similar depths in the A horizons of the studied soil profiles, suggesting some similarity between the anthropogenic factors of formation. The anthropic horizons of profiles P3, P4, and P7 had a eutrophic character and high to very high levels of available phosphorus, compared to P1, P2, P5, and P6, indicating the heterogeneity of the ADEs.

**KEYWORDS**: Pedogenesis, Amazonian soils, anthropic soils.

## 1 I INTRODUÇÃO

As Terras Pretas Arqueológicas (TPAs) são unidades de solo que apresentam como características, coloração escura e a presença de fragmentos cerâmicos e/ou líticos incorporados à matriz dos horizontes superficiais do solo (Kampf & Kern, 2005). As mesmas são caracterizadas por apresentar elevada fertilidade natural, resultante possivelmente da prolongada ocupação antrópica e da incorporação de carvão pirogênico (Corrêa, 2007).

A gênese das TPAs ainda não é bem definida, sendo motivo de divergências entre os pesquisadores, onde a grande maioria relaciona o seu aparecimento à atividade antrópica (Smith, 1980), provavelmente por populações pré-colombianas. Embora aceita, esta hipótese apresenta questionamentos da origem intencional ou como mera consequência da ocupação do homem (Neves et al., 2003).

Segundo Glaser (2007), a formação das TPAs ocorre em três etapas: a) formação do carvão, refere-se à formação do carbono pirogênico, com composição e estrutura molecular complexa (grupos aromáticos), bastante reativo e contribui com à fertilidade do solo; b) incorporação de nutrientes, nesta etapa os nutrientes são incorporados ao solo por diferentes fontes, por exemplo, excrementos humanos e animais, cinzas, resíduos de combustão incompleta e carvão, biomassa de plantas aquáticas e terrestes; e c) ação dos microrganismos, responsáveis pela ciclagem de nutrientes, agindo tanto na decomposição da matéria orgânica como na imobilização de nutrientes do solo evitanto as perdas por lixiviação.

Quanto à distribuição das TPAs, estas ocorrem em manchas descontínuas por toda a Amazônia, estando normalmente associadas aos cursos de água ou em áreas com posição topográfica que permita boa visualização espacial (German, 2003). Em relação às dimensões das áreas de ocorrência das TPAs estas podem se apresentar em pequenas ou grandes extensões (Kämpf & Kern, 2005), dependendo da concepção de grandes sítios de assentamento pré-histórico ocupados por longos períodos de tempo.

O solo das TPAs apresenta horizonte bem drenado, textura variando de arenosa a muito argilosa e presença do horizonte Au antrópico entre 30 a 60 cm (Campos et al., 2012). Além disso, de maneira geral, estes solos possuem pH em água entre 5,2 a 7,0, elevados teores de P, Ca, Mg, Zn, Mn, e alto conteúdo de matéria orgânica estável (Falcão et al., 2001). Em relação às classes de solos de ocorrência das TPAs, estas ocorrem especialmente em Latossolos, Argissolos e Cambissolos (Lima et al., 2002) ou em Neossolos e Espodossolos, conforme afirma Smith (1980), podendo estar em diferentes superfícies geomorfológicas.

Assim, objetivou-se com este trabalho estudar a caracterização e gênese de TPAs na região Sul do Estado do Amazonas.

## 2 I MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Características do meio físico

A área de estudo localiza-se na região Sul do Estado do Amazonas, segundo Köppen, pertencendo ao grupo A (Clima Tropical Chuvoso) e tipo climático Am (chuvas do tipo monção), apresentando um período seco de pequena duração. A pluviosidade está limitada pelas isoietas de 2.250 e 2.750 mm, com período chuvoso iniciando em outubro e prolongando-se até junho. As temperaturas médias anuais variam entre 25°C e 27°C e a umidade relativa do ar entre 85 e 90% (Brasil, 1978).

Os perfis estudados foram distribuídos nos municípios de Apuí, AM e Manicoré, AM às margens da BR 230 - Transamazônica. O perfil localizado no município de Manicoré é oriundo de material de origem proveniente da alteração de granitos Rondonianos, do Pré-Cambriano Superior, sedimentos coluviais, depositados nas partes mais baixas da paisagem e coberturas terciárias (Brasil, 1978). Os perfis localizados no município de Apuí desenvolve-se sobre arenitos líticos com fragmentos de tufos, quartzo arenitos e arenitos conglomeráticos da Formação Beneficente (CPRM, 2005). A vegetação característica dessa região é a floresta tropical densa, constituída por árvores adensadas e multiestratificadas de 20 a 50 m de altura, apresentando clima úmido, elevada temperatura e alta precipitação.

O relevo é marcado pela presença de platôs, nas partes mais elevadas, combinada com áreas rebaixadas de sopé. Os platôs exibem superfícies topográficas planas, sendo a zona de borda marcada por colinas e cristas alinhadas, enquanto as áreas de planícies têm características de superfície pediplanada, localmente interrompida por colinas de topo plano (CPRM, 2001).

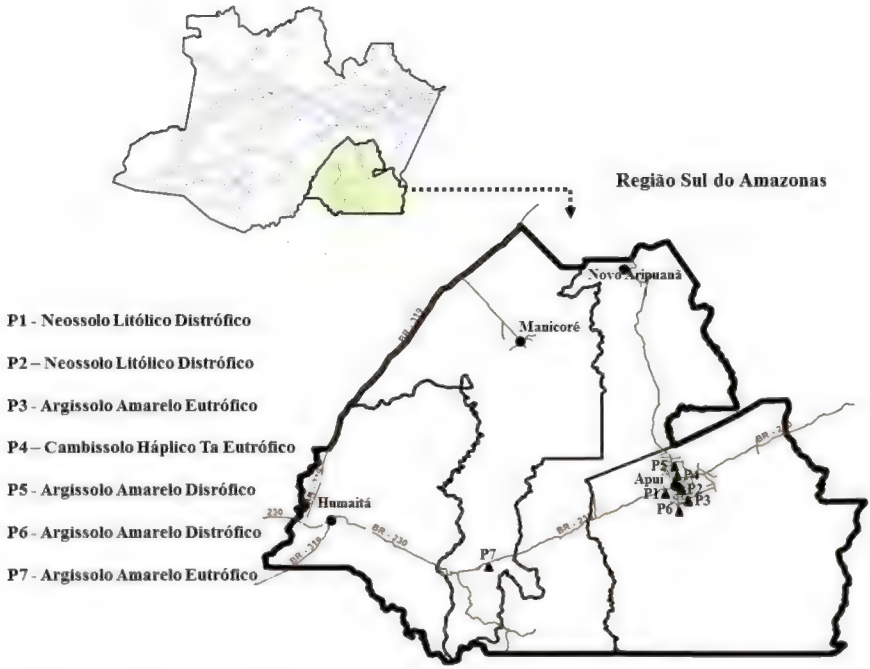



Figura 1. Mapa com a localização das áreas e com as classes de solos em Terras Pretas Arqueológicas na região Sul do Estado do Amazonas.

Foram selecionados sete locais de ocorrência de TPAs, sendo o perfil 7 ($P_7$) localizado no município de Manicoré e os demais perfis ($P_1$, $P_2$, $P_3$, $P_4$, $P_5$ e $P_6$) no município de Apuí (Figura 1). O $P_1$ localizou-se no sopé da paisagem, sob pastagem (S 07° 12' 36.8" e W 059° 55' 16,3); $P_2$ encontrou-se localizado no sopé da paisagem, sob o cultivo de pastagem (S 07° 13' 08.5" e W 059° 53' 09,1"); $P_3$ localizou-se no topo baixo da paisagem, sob o cultivo de hortaliças (S 07° 13' 37,5" e W 059° 52' 06,1"); $P_4$ localizou-se no topo, cultivado com hortaliças (S 07° 11' 55,9" e W 059° 54' 40,9"); $P_5$ localizado no topo da paisagem, cultivado com milho (S 07° 11' 38,0" e W 059° 54' 44,8"); $P_6$ localizado no topo e estava sobre o uso atual de capoeira-pastagem (S 07° 16' 49,4" e W 059° 56' 56,4") e o $P_7$ foi coletado no topo da paisagem, estando sob o cultivo de milho (S 07 56' 33,1" e 61 30' 47,2").

Nesses locais foram abertas trincheiras, sendo os perfis dos solos caracterizados morfologicamente e as amostras de seus horizontes foram coletadas segundo Santos et al., (2005), para as análises físicas e químicas. Os solos foram classificados segundo critérios estabelecidos pelo SiBCS (Embrapa, 2006).

Na etapa de amostragem todo o material foi coletado (incluindo fragmentos cerâmicos e material lítico) e levado para laboratório. Após secagem ao ar, as frações grossas e a terra fina foram separadas e quantificadas via pesagem.

## 2.2 Análises Laboratoriais

As análises texturais foram realizadas pelo método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH 0,1 N como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de alta rotação por 15 minutos, seguindo metodologia proposta pela Embrapa (1997). A fração argila foi separada por sedimentação, as areias grossa e fina por tamisação e o silte foi calculado por diferença. Foi determinada a argila dispersa em água e calculado o grau de floculação, segundo Embrapa (1997).

A densidade do solo foi obtida pelo método do anel volumétrico e a densidade de partícula do solo pelo método do balão volumétrico, conforme Embrapa (1997). A porosidade total foi calculada a partir dos dados obtidos das densidades do solo e de partículas, empregando-se a seguinte expressão: Pt= 100(1- Ds/Dp).

Cálcio, magnésio e potássio trocáveis, assim como o fósforo disponível foram extraídos utilizando-se o método da resina trocadora de íons (Raij et al., 1987). A acidez potencial (H+Al) foi determinada por meio da extração com solução tamponada a pH 7,0 de acetato de cálcio, utilizando-se metodologia proposta pela Embrapa (1997). Com base nos resultados das análises químicas, foram calculadas a soma de bases (SB), a capacidade de troca catiônica (CTC) e a saturação por bases (V).

O pH foi determinado potenciometricamente utilizando-se relação 1:2,5 de solo: em água e KCl (Embrapa, 1997). O carbono orgânico total foi determinado pelo método de oxidação via úmida, com aquecimento externo (Yeomans & Bremner, 1988), e a matéria orgânica foi estimada com base no carbono orgânico total (Embrapa, 1997).

Na terra fina seca ao ar (TFSA), os elementos Al e Fe foram extraídos por digestão com $H_2SO_4$ 1:1, e o Si por posterior dissolução alcalina. Os resultados foram expressos na forma de óxidos ($Al_2O_3$, $Fe_2O_3$ e $SiO_2$), segundo método descrito por Embrapa (1979). As formas cristalinas de ferro ($Fe_d$) foram extraídas com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB) conforme proposto por Mehra e Jackson (1960) e os óxidos pouco cristalinos de ferro ($Fe_o$) por oxalato ácido de amônio (Camargo et al., 1986).

# 3 I RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 3.1 Atributos Morfológicos

Todos os perfis estudados apresentaram fragmentos cerâmicos e material lítico incorporados à matriz de seus horizontes superficiais (Tabela 1), com destaque para P3 que apresentaram maiores quantidades de fragmentos cerâmicos, segundo Kampf & Kern (2005) essa é uma das principais características das TPAs.

Constatou-se que os horizontes superficiais apresentaram cores cinza muito escuro, com matiz 10YR e cromas variando entre 1 e 2, exceto para P7 que apresentou matiz de 5Y (Tabela 1), diferenciando-se dos demais solos. Já os horizontes subsuperficiais

apresentaram cores amareladas, marcando uma nítida diferenciação entre o horizonte Au e os demais horizontes subsuperficiais, corroborando com resultados encontrados por Kern (1996); Lima (2001) e Campos et al., (2011), que relataram a coloração escura dos horizontes superficiais dos solos em sítios de TPAs. Para Kern & Kampf (1989) e Glaser et al., (2000) a coloração escura dos horizontes antrópicos são resultantes dos elevados teores de matéria orgânica acumulada e altos teores de resíduos oriundos de queima parcial.

Os horizontes antropogênicos apresentaram espessura entre 27 e 50 cm, indicando que esses sítios apresentaram semelhanças entre si, refletindo o tempo de ocupação e densidades populacionais similares. Segundo Denevan (1996), a intensidade da cor e a profundidade de ocorrência dos horizontes antrópicos são produtos do tempo de ocupação dos sítios. Por outro lado, Campos et al., (2011) em estudos de TPAs na região do Médio Rio Madeira observaram que os horizontes antropogênicos variaram de 37 a 50 cm de profundidade. Já para Smith (1980) a grande maioria dos solos em sítios de TPAs apresentam o horizonte A com 36 a 73 cm de profundidade, embora o mesmo já tenha mencionado a ocorrência de TPAs com até 2 m de profundidade.

Verificou-se que os horizontes antropogênicos apresentaram textura variando entre franca, franco-arenosa, franco-siltosa e franco-argilosa, enquanto que nos horizontes diagnósticos subsuperficiais as texturas foram classificadas como franco-siltosa, franca, argilosa e muito argilosa (Tabela 1), semelhantemente aos trabalhos realizados por Lima et al., (2002) em que destacam que as TPAs são bem drenadas e com textura variando de arenosa a muito argilosa, devido aos aspectos pedogenéticos.

| Horiz. | Prof. | Material Lítico | Fragmentos Cerâmicos | Cor (úmida) | [1]Textura | [2]Estrutura | [3]Consistência (úmido e molhado) | [4]Transição |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (cm) | | $g.kg^{-1}$ | | | | | |
| P1 - Neossolo Litólico Distrófico típico, textura arenosa, A antrópico | | | | | | | | |
| $Aup_1$ | 0 -19 | 50,00 | 75,80 | 10YR 2/2 | fr.arenosa | mod. méd. a gr. bl. ang. | mfri., nplás. npeg. | gra. e pla. |
| $Au_2$ | 19 -35 | 21,90 | 66,08 | 10YR 2/1 | fr.arenosa | fo. gr. a mgr. bl. ang. | fri. nplás. npeg. | - |
| P2 - Neossolo Litólico Distrófico típico, textura siltosa, A antrópico | | | | | | | | |
| $Au_1$ | 0 -24 | 0,0 | 54,06 | 10YR 2/1 | fr.siltosa | mod. mpeq. a peq. gran. | mfri. lig.plás. lig.peg. | gra. e pla. |
| $Au_2$ | 24 -50 | 16,53 | 14,14 | 10YR 2/1 | fr.siltosa | fo. peq. a méd. gran. | mfri. lig.plás. lig.peg. | - |
| P3 - Argissolo Amarelo Eutrófico típico, textura argilosa, A antrópico | | | | | | | | |
| $Aup_1$ | 0 – 22 | 9,48 | 220,06 | 10 YR 2/1 | fr.siltosa | mod. peq. a méd. gran. | lig.plás. lig. peg. | dif. e pla. |
| $Au_2$ | 22- 40 | 0,0 | 57,94 | 10 YR 2/2 | fr.siltosa | fo. gr. a mgr. gran. | lig.plás. lig. peg. | dif. e pla. |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AB | 40 -64 | 0,0 | 0,0 | 10 YR 3/2 | argilosa | mod. méd. a gr. bl. ang. a bl. sub | plás. peg. | dif. e pla. |
| BA | 64 -87 | 0,0 | 0,0 | 10 YR 3/2 | argilosa | fo. gr. a mgr. bl. ang. a bl. sub | plás. peg. | cla. e pla. |
| $Bt_1$ | 87 -116 | 0,0 | 0,0 | 10 YR 4/4 | argilosa | fo. méd a gr. bl. ang. a bl. sub | mplás. mpeg. | cla. e pla. |
| $Bt_2$ | 116 -146+ | 0,0 | 0,0 | 10 YR 6/6 | mt. argilosa | fo. méd. a gr. bl. ang. a bl. sub | plás. peg. | - |
| P4 - Cambissolo Háplico Ta Eutrófico léptico, textura siltosa, A antrópico | | | | | | | | |
| $Au_1$ | 0 – 22 | 216,12 | 94,15 | 10 YR 2/2 | fr.siltosa | fo. méd. a gr. gran. | mfri. lig.plás. lig.peg. | cla. e pla. |
| $Au_2$ | 22 - 44 | 124,54 | 94,92 | 10 YR 2/1 | fr.siltosa | mod. peq. a méd. gran. | fri. lig.plás. lig. peg. | gra. e ond. |
| AC | 44 – 62 | 260,78 | 0,0 | 10 YR 3/3 | fr.arg.siltosa | fo. méd. a gr. bl. ang. e bl. sub | fri. plás. peg. | cla. e pla. |
| CR/Bi | 62 | 190,80 | 0,0 | 10 YR 4/3 | fr.arg.siltosa | fr. méd. gran. | fri. plás. peg. | - |
| P5 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura argilosa, A antrópico | | | | | | | | |
| $Aup_1$ | 0 – 16 | 20,90 | 66,90 | 10 YR 2/1 | fr.siltosa | fo. méd. a gr. gran. | fri. lig.plás. lig. peg | gra. e pla. |
| $Au_2$ | 16- 35 | 10,83 | 55,80 | 10 YR 2/1 | fr.siltosa | fo. gr. a mgr. gran. | mfri. nplás. npeg. | dif. e pla. |
| AB | 35 -58 | 0,0 | 0,0 | 10 YR 2/2 | fr.siltosa | fo. gr. a mgr. bl. ang. a bl. sub | fri. lig.plás. lig. peg. | gra. e pla. |
| B/A | 58 – 86 | 0,0 | 0,0 | 10 YR 3/2 | fr.arg.siltosa | mod. méd. a gr. bl. ang. a bl. sub | fri. plás. peg. | gra. e pla. |
| $Bt_1$ | 86 – 110 | 0,0 | 0,0 | 10 YR 4/6 | fr.arg.siltosa | mod. méd. a gr. bl. ang. a bl. sub | fir. plás. peg. | dif. e pla. |
| $Bt_2$ | 110 - 125 | 0,0 | 0,0 | 10 YR 6/8 | argilosa | fr. méd. a gr. bl. ang. a bl. sub | fri. plás. peg. | - |
| P6 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura argilosa, A antrópico | | | | | | | | |
| $Au_1$ | 0 – 12 | 35,08 | 32,82 | 10 YR 3/2 | fr.argilosa | fo. mpeq. a peq. gran. | fri. lig.plás. lig. peg. | cla. e pla. |
| $Au_2$ | 12- 27 | 44,80 | 13,50 | 10 YR 2/2 | fr.argilosa | fo. gr. a mgr. gran. | fri. lig.plás. lig,peg. | gra. e pla. |
| BA | 27 – 44 | 0,0 | 0,0 | 10 YR 4/6 | argilosa | fo. méd. a gr. bl. ang. a gran. | fri. plás. peg. | dif. e pla. |
| $Bt_1$ | 44 – 65 | 0,0 | 0,0 | 10 YR 5/6 | argilosa | fo. méd. a gr. bl. ang. a bl. sub | fir. mplás. mpeg. | dif. e pla. |
| $Bt_2$ | 65 - 89 | 0,0 | 0,0 | 10 YR 6/6 | argilosa | fo. gr. a mgr. bl. sub a gran. | fir. mplás. mpeg. | gra. e pla. |
| $Bt_3$ | 89 - 115+ | 0,0 | 0,0 | 10 YR 6/6 | mt. argilosa | fo. gr. a mgr. bl. ang. a bl. sub | fir. mplás. mpeg. | - |
| P7 - Argissolo Amarelo Eutrofico típico, textura argilosa, A antrópico | | | | | | | | |
| $Aup_1$ | 0 – 19 | 11,15 | 67,90 | 5 Y 2,5/1 | franca | fo. mpeq. gran. | mfri. nplás. npeg | cla. e pla. |
| $Au_2$ | 19 – 35 | 12,80 | 13,50 | 5 Y 2,5/1 | fr.arenosa | fo. mpeq. gran. | mfri. nplás. npeg. | cla. e pla. |
| AB | 35 – 64 | 0,0 | 0,0 | 5 Y 2,5/2 | fr.argilosa | fo. mpeq. gran. | mfri. nplás. npeg. | dif. e pla. |
| BA | 64 – 89 | 0,0 | 0,0 | 5 Y 3/2 | argilosa | fo. mpeq. gran. | mfri. nplás. lig. peg. | dif. e pla. |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Bt_1$ | 89 – 121 | 0,0 | 0,0 | 5 Y 5/4 | argilosa | mod. mpeq. bl. sub e gran. | mfri. lig.plás. lig.peg. | cla. e pla. |
| $Bt_2$ | 121 - 150 | 0,0 | 0,0 | 5 Y 6/8 | argilosa | fo. peq. gran. | mfri. lig.plás. lig.peg. | - |

Horiz.: horizonte; Prof.: profundidade. [1] fr.: franco; fr.arg.: franco-argiloso; mt.: muito.[2] fr.: fraca, mod.: moderada; fo.:forte; peq.: pequena, mpeq.: muito pequena; méd.: média: gr.: grande; mgr.: muito grande; gran.: granular; bl. ang.: blocos angulares; bl. sub.: blocos subangulares. [3] mfri.: muito friável; fri.: friável; fir.: firme; nplás.: não plástico; lig.plás.: ligeiramente plástico; plás.: plástico; mplás.: muito plástico; npeg.: não pegajoso; lig.peg.: ligeiramente pegajoso; peg.: pegajoso; mpeg.:muito pegajoso. [4] cla.: clara; pla.: plana; gra.:gradual; ond.: ondulada; dif.: difusa.

Tabela 1. Características morfológicas de perfis de Terras Pretas Arqueológicas na região Sul do Estado do Amazonas.

Exceto o P1, os demais horizontes antrópicos exibiram estrutura granular variando de moderado a forte o seu grau de desenvolvimento (Tabela 1). Para Cunha et al., (2007), este resultado deve-se à ação do carbono pirogênico (particulado, livre, protegido e em complexos organo-minerais), que tem papel importante na formação e estabilização dos agregados. Já os horizontes subsuperficiais, a estrutura variou entre granular (P2 e P7) blocos angulares e subangulares (P1, P3, P4, P5 e P6).

A consistência úmida apresentou-se variando de friável a muito friável nos horizontes antrópicos, enquanto que nos horizontes subsuperficiais foram observadas a consistência friável e firme. A consistência molhada nos horizontes antrópicos, variou de não plástica a ligeiramente plástica, também foi verificado solos não plástico a ligeiramente plástico. Já os horizontes subsuperficiais, tanto a plasticidade como a pegajosidade tenderam a aumentar em profundidade (Tabela 1).

## 3.2 Atributos Físicos

Observou-se a dominância da fração silte no horizonte antrópico (Tabela 2) de todos os perfis estudados, exceto no P1 que apresentou a areia como a fração dominante, este fato deve-se a proximidade do material de origem. Em relação aos horizontes subsusperficiais, excetuando-se o P1 que apresentou textura arenosa, P2 e P4 domínio da fração silte, refletindo seu estágio inicial de pedogênese e natureza do material de origem, todos os demais perfis (P3, P5, P6 e P7) exibiram presença marcante de frações mais finas (argila) em profundidade, corroborando com resultados encontrados por Campos et al., (2011).

A argila dispersa em água apresentou valores mais elevados com o aumento da profundidade, com exceção para os P1, P5 e P6 que apresentaram resultados contrários. O grau de floculação tem maior expressão nos horizontes A antrópico (Tabela 2). Estes resultados estão em concordância com Lima et al., (2002) que afirmam que em TPAs apesar das condições climáticas favoráveis à destruição dos agregados do solo, o estado de organização da estrutura é tão fortemente desenvolvido que não propicia a desagregação. Além disso, a elevada atividade biológica e o teor de matéria orgânica, especialmente os

ácidos húmico e fúlvico favorecem a maior agregação.

A relação silte/argila (S/A) apresentou valores distintos entre os solos sendo que os perfis P1, P2 e P4 apresentaram os valores mais elevados da relação S/A, coincidindo com os solos menos desenvolvidos. De modo geral todos os horizontes antrópicos apresentaram uma relação silte/argila mais elevada em comparação aos horizontes subsuperficiais (Tabela 2). Segundo Marques Júnior (1995) e Jacomine (2005) a relação S/A é utilizada como um índice auxiliar na indicação do grau de intemperismo dos solos, desta maneira quanto maior o valor desta relação menos intemperizado é o solo.

| Horiz. | Prof. | Areia grossa | Areia fina | Silte | Argila | AD | GF | S/A | Ds | Dp | Pt |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | cm | ..... g $kg^{-1}$ ..... | | | | % | | | .. g $cm^{-3}$.. | | % |
| P1 - Neossolo Litólico Distrófico típico, textura arenosa, A antrópico | | | | | | | | | | | |
| $Aup_1$ | 0 -19 | 697 | 14 | 196 | 93 | 4,2 | 53 | 2,1 | 1,4 | 2,7 | 50 |
| $Au_2$ | 19 -35 | 709 | 16 | 192 | 83 | 2,4 | 70 | 2,3 | 1,3 | 2,8 | 51 |
| P2 - Neossolo Litólico Distrófico típico, textura siltosa, A antrópico | | | | | | | | | | | |
| $Au_1$ | 0 -24 | 151 | 26 | 672 | 151 | 6,5 | 56 | 4,4 | 0,8 | 2,5 | 66 |
| $Au_2$ | 24 -50 | 121 | 17 | 696 | 166 | 8,2 | 50 | 4,1 | 0,8 | 2,7 | 68 |
| P3 - Argissolo Amarelo Eutrófico típico, textura argilosa, A antrópico | | | | | | | | | | | |
| $Aup_1$ | 0 – 22 | 86 | 128 | 504 | 281 | 16,6 | 28 | 1,7 | 0,7 | 2,5 | 69 |
| $Au_2$ | 22- 40 | 82 | 128 | 443 | 347 | 26,1 | 24 | 1,2 | 1,0 | 2,6 | 62 |
| AB | 40 -64 | 86 | 126 | 398 | 390 | 35,4 | 24 | 1,0 | 1,2 | 2,7 | 57 |
| BA | 64 -87 | 67 | 89 | 294 | 550 | 46,2 | 16 | 0,5 | 1,2 | 2,9 | 57 |
| $Bt_1$ | 87 -116 | 54 | 76 | 294 | 576 | 48,7 | 15 | 0,5 | 1,3 | 2,8 | 52 |
| $Bt_2$ | 116 -146+ | 58 | 76 | 253 | 613 | 50,4 | 17 | 0,4 | 1,3 | 2,8 | 53 |
| P4 - Cambissolo Háplico Ta Eutrófico léptico, textura siltosa, A antrópico | | | | | | | | | | | |
| $Au_1$ | 0 – 22 | 62 | 88 | 608 | 242 | 9,5 | 17 | 2,5 | 1,0 | 2,5 | 59 |
| $Au_2$ | 22 - 44 | 56 | 91 | 593 | 260 | 9,1 | 38 | 2,2 | 1,0 | 2,7 | 62 |
| AC | 44 – 62 | 54 | 85 | 583 | 278 | 12,1 | 19 | 2,0 | 1,1 | 2,7 | 57 |
| CR/Bi | 62+ | 53 | 88 | 513 | 346 | 11,2 | 42 | 1,4 | nd | nd | nd |
| P5 - Argissolo Amarelo Ditrófico típico, textura argilosa, A antrópico | | | | | | | | | | | |
| $Aup_1$ | 0 – 16 | 150 | 162 | 450 | 238 | 3,5 | 54 | 1,8 | 1,0 | 2,6 | 62 |
| $Au_2$ | 16- 35 | 149 | 150 | 464 | 237 | 7,1 | 27 | 1,9 | 0,8 | 2,5 | 67 |
| AB | 35 -58 | 125 | 152 | 478 | 245 | 4,7 | 59 | 1,9 | 0,9 | 2,6 | 65 |
| BA | 58 – 86 | 57 | 98 | 410 | 435 | 9,9 | 38 | 0,9 | 1,1 | 2,8 | 58 |
| $Bt_1$ | 86 – 110 | 56 | 98 | 408 | 438 | 0,4 | 97 | 0,9 | 1,2 | 2,8 | 56 |
| $Bt_2$ | 110 - 125 | 56 | 105 | 367 | 472 | 0,1 | 99 | 0,7 | 1,2 | 2,8 | 56 |
| P6 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura argilosa, A antrópico | | | | | | | | | | | |
| $Au_1$ | 0 – 12 | 104 | 143 | 440 | 313 | 15,0 | 52 | 1,4 | 0,9 | 2,7 | 64 |
| $Au_2$ | 12- 27 | 87 | 151 | 396 | 366 | 25,9 | 29 | 1,0 | 1,0 | 2,6 | 59 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BA | 27 – 44 | 76 | 105 | 268 | 551 | 33,9 | 38 | 0,4 | 1,3 | 2,8 | 54 |
| $Bt_1$ | 44 – 65 | 55 | 80 | 268 | 597 | 1,4 | 97 | 0,4 | 1,2 | 2,8 | 56 |
| $Bt_2$ | 65 - 89 | 51 | 72 | 290 | 587 | 0,0 | 100 | 0,4 | 1,3 | 2,9 | 55 |
| $Bt_3$ | 89 - 115+ | 51 | 78 | 254 | 617 | 0,1 | 99 | 0,4 | 1,2 | 2,7 | 54 |
| P7 - Argissolo Amarelo Eutrófico típico, textura argilosa, A antrópico | | | | | | | | | | | |
| $Aup_1$ | 0 – 19 | 297 | 145 | 372 | 196 | 9,4 | 38 | 1,8 | 1,4 | 2,6 | 43 |
| $Au_2$ | 19 – 35 | 367 | 145 | 289 | 199 | 11,4 | 42 | 1,4 | 1,7 | 2,8 | 40 |
| AB | 35 – 64 | 282 | 133 | 258 | 327 | 22,6 | 30 | 0,7 | 1,7 | 2,8 | 39 |
| BA | 64 – 89 | 253 | 125 | 155 | 467 | 31,9 | 31 | 0,3 | 1,8 | 2,9 | 36 |
| $Bt_1$ | 89 – 121 | 235 | 130 | 165 | 470 | 29,0 | 38 | 0,3 | 1,8 | 2,9 | 37 |
| $Bt_2$ | 121 - 150 | 267 | 121 | 153 | 459 | 26,6 | 41 | 0,3 | 1,8 | 2,8 | 36 |

Horiz.; horizonte; Prof.: profundidade; AD: argila dispersa em água; GF: grau de floculação; S/A: silte/argila; Ds: densidade do solo; Dp: densidade de partícula; Pt: porosidade total.

Tabela 2. Atributos físicos de perfis de Terras Pretas Arqueológicas na região Sul do Estado do Amazonas.

De maneira geral a densidade do solo foi menor nos horizontes antropogênicos de todos os perfis estudados, e aumentou com a profundidade (Tabela 2). Resultados semelhante foram encontrados por Campos et al., (2012) em áreas de TPAs na região de Manicoré, AM. Neves Junior (2008) estudando solos com A antrópico na Amazônia Central afirma que a baixa densidade do solo nos horizontes antropogênicos relaciona-se aos altos teores de carbono orgânico. Para Steinbeiss et al., (2009), a menor densidade do solo nos horizontes superficiais pode se resultante ainda da intensa atividade biológica (fauna e raízes), que contribui para a formação de bioporos.

A densidade de partículas apresentou valores semelhantes em todos os perfis, evidenciando a presença de partículas de mesma natureza mineral (Tabela 2). Já a porosidade total nos horizontes antropogênicos é mais elevada que nos demais horizontes subsuperficiais. Segundo Campos et al., (2011), estes resultados relacionam-se aos elevados teores de matéria orgânica e a intensa atividade biológica nos horizontes antrópicos.

## 3.3 Atributos químicos

Os valores de pH em água nos horizontes antropogênicos variaram de 4,5 a 6,8, já os valores do pH em KCl foram sempre menores variando de 3,7 a 5,7 (Tabela 3), esses resultados são semelhantes aos encontrados por Falcão et al., (2009) de 4,3 a 6,6 o pH em água e de 3,7 a 6,0 o pH em KCl, as diferenças de pH nos solos estudados evidencia a natureza heterogênica de ocorrência de TPAs, seja pelas condições pedoambientais ou atividade humana em cada local. O valor do ΔpH foi negativo para todos os horizontes dos solos estudados, indicando a predominância de argilas silicatadas e maior capacidade deste em reter cátions.

Os teores de $Ca^{2+}$ e $Mg^{2+}$ trocáveis foram mais elevados nos horizontes antropogênicos (Tabela 3) dos perfis P3, P4 e P7, o que está de acordo com Steiner et al., (2004), que afirmaram que, em geral as TPAs exibem elevados níveis de nutrientes, principalmente Ca e P, provavelmente, proveniente de restos de ossos humanos e de animais, além da formação de complexos matéria orgânica-cálcio de alta estabilidade, estando associado ao carvão pirogênico (Novotny et al., 2007). Já os perfis P1, P2, P5 e P6 exibiram baixos teores de $Ca^{2+}$ e $Mg^{2+}$, o que pode ser reflexo da variação do tempo e da densidade da ocupação humana nas áreas (Campos et al., 2012).

Os maiores resultados de soma de bases foram observados nos horizontes antropogênicos quando comparados aos horizontes subsuperficiais. Entretanto, também foram notadas diferenças entre os perfis de TPAs estudados, com valores mais elevados nos perfis P3, P7 e P4, de 18,52; 17,84 e 14,42 $cmol_c\ kg^{-1}$, respectivamente, e 0,38; 1,16; 1,90 e 2,39 $cmol_c\ kg^{-1}$, para os perfis P2, P1, P4 e P6, respectivamente (Tabela 3), concordando com os resultados de Lehmann et al., (2003).

| Horiz. | Prof. | pH $H_2O$ | pH KCl | ΔpH | $Ca^{2+}$ | $Mg^{2+}$ | $K^+$ | SB | $Al^{3+}$ | H+Al | CTC | V | m | P | COT | MO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | cm | | | ..... $cmol_c\ kg^{-1}$ ..... | | | | | | ..... % ..... | | mg $kg^{-1}$ | g $kg^{-1}$ | | | |
| P1 – Neossolo Litólico Distrófico típico, textura arenosa, A antrópico | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $Aup_1$ | 0 -19 | 5,5 | 4,0 | -1,5 | 0,70 | 0,40 | 0,06 | 1,16 | 0,95 | 9,32 | 10,48 | 11,07 | 45,02 | 95,0 | 50,63 | 87,29 |
| $Au_2$ | 19 -35 | 5,4 | 4,0 | -1,3 | 2,20 | 0,60 | 0,10 | 2,90 | 0,61 | 9,90 | 12,80 | 22,66 | 17,38 | 107,0 | 52,87 | 91,14 |
| P2 – Neossolo Litólico Distrófico típico, textura siltosa, A antrópico | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $Au_1$ | 0 -24 | 4,9 | 4,1 | -0,8 | 0,20 | 0,10 | 0,08 | 0,38 | 0,71 | 15,35 | 15,73 | 2,42 | 65,14 | 39,0 | 50,63 | 87,29 |
| $Au_2$ | 24 -50 | 5,2 | 4,1 | -1,0 | 0,20 | 0,10 | 0,07 | 0,37 | 0,85 | 12,21 | 12,58 | 2,94 | 69,67 | 48,0 | 52,87 | 91,14 |
| P3 – Argissolo Amarelo Eutrófico típico, textura argilosa, A antrópico | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $Aup_1$ | 0 – 22 | 6,6 | 5,4 | -1,1 | 15,60 | 2,50 | 0,42 | 18,52 | 0,35 | 6,93 | 25,45 | 72,77 | 1,85 | 425,0 | 73,06 | 125,95 |
| $Au_2$ | 22- 40 | 6,6 | 5,2 | -1,4 | 12,50 | 1,50 | 0,16 | 14,16 | 0,72 | 6,77 | 20,93 | 67,65 | 4,84 | 384,0 | 52,47 | 90,46 |
| AB | 40 -64 | 6,8 | 5,2 | -1,5 | 9,90 | 1,30 | 0,12 | 11,32 | 0,21 | 5,20 | 16,52 | 68,52 | 1,82 | 371,0 | 30,03 | 51,76 |
| BA | 64 -87 | 6,6 | 5,3 | -1,3 | 7,70 | 1,00 | 0,10 | 8,80 | 0,45 | 4,54 | 13,34 | 65,97 | 4,86 | 146,0 | 25,6 | 44,13 |
| $Bt_1$ | 87 -116 | 6,3 | 5,0 | -1,2 | 5,30 | 0,70 | 0,10 | 6,10 | 0,25 | 3,71 | 9,81 | 62,18 | 3,94 | 126,0 | 21,93 | 37,8 |
| $Bt_2$ | 116 -146+ | 6,3 | 5,0 | -1,2 | 4,00 | 0,60 | 0,10 | 4,70 | 0,41 | 4,04 | 8,74 | 53,78 | 8,02 | 126,0 | 20,37 | 35,12 |
| P4 – Cambissolo Háplico Ta Eutrófico léptico, textura siltosa, A antrópico | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $Au_1$ | 0 – 22 | 6,4 | 5,0 | -1,3 | 12,60 | 1,40 | 0,42 | 14,42 | 0,21 | 9,98 | 24,40 | 59,10 | 1,44 | 432,0 | 98,87 | 170,46 |
| $Au_2$ | 22 - 44 | 6,5 | 4,8 | -1,6 | 8,90 | 1,20 | 0,25 | 10,35 | 0,41 | 11,47 | 21,82 | 47,43 | 3,81 | 517,0 | 90,25 | 155,6 |
| AC | 44 – 62 | 6,3 | 4,7 | -1,5 | 5,80 | 0,90 | 0,18 | 6,88 | 0,21 | 9,65 | 16,53 | 41,62 | 2,96 | 475,0 | 30,34 | 52,31 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CR/Bi | 62+ | 5,7 | 4,5 | -1,2 | 4,50 | 0,90 | 0,12 | 5,52 | 0,22 | 8,66 | 14,18 | 38,93 | 3,83 | 449,0 | 25,64 | 44,2 |
| P5 – Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura argilosa, A antrópico | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $Aup_1$ | 0 – 16 | 5,0 | 4,0 | -0,9 | 1,30 | 0,50 | 0,10 | 1,90 | 1,15 | 17,24 | 19,14 | 9,93 | 37,70 | 94,0 | 111,48 | 192,19 |
| $Au_2$ | 16- 35 | 5,3 | 4,1 | -1,2 | 0,70 | 0,30 | 0,05 | 1,05 | 0,81 | 14,93 | 15,98 | 6,57 | 43,55 | 88,0 | 67,95 | 117,15 |
| AB | 35 -58 | 5,3 | 4,2 | -1,1 | 0,30 | 0,20 | 0,03 | 0,53 | 0,72 | 12,54 | 13,07 | 4,06 | 57,60 | 78,0 | 59,17 | 102,01 |
| BA | 58 – 86 | 5,3 | 4,2 | -1,1 | 0,30 | 0,20 | 0,06 | 0,56 | 0,55 | 9,41 | 9,97 | 5,62 | 49,55 | 73,0 | 45,05 | 77,66 |
| $Bt_1$ | 86 – 110 | 5,3 | 4,3 | -1,0 | 0,30 | 0,20 | 0,06 | 0,56 | 0,45 | 7,10 | 7,66 | 7,31 | 44,55 | 87,0 | 21,85 | 37,66 |
| $Bt_2$ | 110 - 125 | 4,8 | 4,4 | -0,3 | 0,30 | 0,10 | 0,05 | 0,45 | 0,41 | 5,94 | 6,39 | 7,04 | 47,67 | 100,0 | 20,13 | 34,7 |
| P6 – Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura argilosa, A antrópico | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $Au_1$ | 0 – 12 | 4,5 | 3,7 | -0,7 | 1,80 | 0,50 | 0,09 | 2,39 | 0,51 | 15,84 | 18,23 | 13,11 | 17,59 | 90,0 | 96,32 | 166,05 |
| $Au_2$ | 12 - 27 | 4,6 | 3,7 | -0,9 | 0,70 | 0,30 | 0,05 | 1,05 | 1,03 | 15,10 | 16,15 | 6,50 | 49,52 | 107,0 | 86,26 | 148,72 |
| BA | 27 – 44 | 4,7 | 3,6 | -1,0 | 0,40 | 0,20 | 0,04 | 0,64 | 1,89 | 11,14 | 11,78 | 5,43 | 74,70 | 74,0 | 42,73 | 73,67 |
| $Bt_1$ | 44 – 65 | 4,8 | 3,6 | -1,1 | 0,30 | 0,20 | 0,04 | 0,54 | 1,81 | 8,00 | 8,54 | 6,32 | 77,02 | 73,0 | 22,72 | 39,24 |
| $Bt_2$ | 65 - 89 | 4,5 | 3,6 | -0,9 | 0,30 | 0,20 | 0,04 | 0,54 | 1,79 | 6,68 | 7,22 | 7,48 | 76,82 | 81,0 | 20,65 | 35,6 |
| $Bt_3$ | 89 - 115+ | 4,4 | 3,6 | -0,8 | 0,20 | 0,10 | 0,03 | 0,33 | 1,31 | 7,01 | 7,34 | 4,50 | 79,88 | 90,0 | 19,73 | 34,02 |
| P7 - Argissolo Amarelo Eutrófico típico, textura argilosa, A antrópico | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $Aup_1$ | 0 – 19 | 6,5 | 5,7 | -0,8 | 14,80 | 2,90 | 0,14 | 17,84 | 0,45 | 5,94 | 23,78 | 75,02 | 2,46 | 347,0 | 65,4 | 112,74 |
| $Au_2$ | 19 – 35 | 6,1 | 5,0 | -1,1 | 9,20 | 1,60 | 0,05 | 10,85 | 0,19 | 7,43 | 18,28 | 59,35 | 1,72 | 150,0 | 48,80 | 84,13 |
| AB | 35 – 64 | 6,5 | 5,0 | -1,5 | 4,50 | 0,60 | 0,02 | 5,12 | 0,59 | 5,28 | 10,40 | 49,23 | 10,33 | 105,0 | 25,96 | 44,75 |
| BA | 64 – 89 | 6,4 | 5,0 | -1,3 | 2,80 | 0,40 | 0,01 | 3,21 | 0,46 | 4,79 | 8,00 | 40,13 | 12,53 | 100,0 | 37,55 | 64,73 |
| $Bt_1$ | 89 – 121 | 6,4 | 5,2 | -1,1 | 1,90 | 0,30 | 0,01 | 2,21 | 0,69 | 3,63 | 5,84 | 37,84 | 23,79 | 39,0 | 21,97 | 37,87 |
| $Bt_2$ | 121 - 150 | 6,3 | 5,6 | -0,6 | 1,20 | 0,20 | 0,01 | 1,41 | 0,41 | 3,05 | 4,46 | 31,61 | 22,53 | 14,0 | 19,73 | 34,02 |

Horiz.; horizonte; Prof.: profundidade; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca de cátions; V: saturação por bases; m: saturação de alumínio.

Tabela 3. Caracterização química de perfis de Terras Pretas Arqueológicas na região Sul do Estado do Amazonas.

Com relação à capacidade de troca de cátions (CTC), verificou-se também que os perfis P3, P4 e P7 foram os que apresentaram maiores valores quando comparados aos perfis P1, P2, P5 e P6. Para todos os perfis estudados há nítida tendência de decréscimo da CTC com a profundidade do solo, comportamento também observado por Glaser et al., (2000) em estudos de TPAs na Amazônia.

A saturação por bases revelou valores mais elevados nos horizontes antrópicos de todos os perfis estudados, valendo ressaltar que no perfil P3 os valores do V% foram também elevados nos horizontes subsuperficiais, resultado que não foi observado para

os demais perfis estudados. Provavelmente, o impacto da ação antrópica não se limita aos horizontes superficiais, mas pode alterar o solo em profundidade, contando com a contribuição de processos pedogênicos (melanização, lessivagem e bioturbação) (Kern & Kampf, 2005).

Outro aspecto importante em relação a saturação por bases é que apenas os perfis P3, P4 e P7 apresentaram-se eutróficos, enquanto que os demais revelaram comportamento distrófico, evidenciando que as TPAs podem também ter características semelhantes a solos não antropogênicos, este fato pode esta relacionado ao uso não sustentado dado a estes solos.

Os teores de fósforo disponível foram elevados nos horizontes antropogênicos, entretanto com valores oscilando entre os perfis estudados, com destaque para os perfis P3 que tiveram teores entre 126 e 425 mg $kg^{-1}$, P4 com teores de P entre 432 a 517 mg $kg^{-1}$ e P7 entre 14 e 347 mg $kg^{-1}$ de P (Tabela 3). Estes resultados são provavelmente decorrentes da intensidade da incorporação de detritos pelos antigos habitantes, conforme destacam Fraser & Clement (2008) em estudo sobre solos de TPAs na região Amazônica.

Os teores de carbono orgânico oscilaram entre 25,96 a 111,48 g $kg^{-1}$ nos horizontes antrópicos (Tabela 3), havendo um decréscimo deste com a profundidade do solo, resultados similares foram obtidos por Campos et al., (2011). O conteúdo elevado de carbono nas TPAs, mesmo estando em ambiente propício à decomposição da matéria orgânica e lixiviação, pode ser atribuído composição da matéria orgânica rica em carbono pirogênico (carvão) adicionada ao solo pela atividade dos povos indígenas pré-colombianos (Glaser, 2000).

Os teores totais de $Fe_2O_3$ foram semelhante em todos os perfis estudados e com tendência de aumento em profundidade (Tabela 4), exceção ao P1 que apresentou menor teor. Este fato deve-se, possivelmente, ao regime de umidade associado aos teores de matéria orgânica e carência do material de origem do sítio do P1 que pode favorecer a mobilização, redistribuição e exportação do ferro na forma amorfa ($Fe_o$) para outros locais, incidindo diretamente na expressão de cores de cromas mais baixos, em relação aos demais perfis. Já em relação aos teores totais de $Al_2O_3$ verificou-se que nos perfis P2, P6 e P7 os conteúdos foram mais elevados enquanto que o P1 exibe os menores valores totais, demonstrando maior ação do intemperismo e riqueza de alumínio no material de origem em P1, P6 e P7 em relação aos demais perfis estudados.

| Horiz | Prof. | Óxidos do Ataque Sulfúrico | | | Relações | | (1)$Fe_d$ | (2)$Fe_o$ | Relações | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $SiO_2$ | $Fe_2O_3$ | $Al_2O_3$ | Ki | Kr | | | $\frac{Fe_o}{Fe_d}$ | $\frac{Fe_d}{Fe_t}$ |
| | cm | ..... g $kg^{-1}$ ..... | | | | | .....g $kg^{-1}$ ..... | | | |
| P1 – Neossolo Litólico Distrófico típico, textura arenosa, A antrópico | | | | | | | | | | |
| $Aup_1$ | 0 -19 | 24,0 | 27,3 | 75,0 | 0,54 | 0,44 | 6,4 | 3,8 | 0,59 | 0,23 |
| $Au_2$ | 19 -35 | 37,0 | 17,9 | 70,0 | 0,90 | 0,77 | 3,5 | 2,7 | 0,77 | 0,20 |
| P2 – Neossolo Litólico Distrófico típico, textura siltosa, A antrópico | | | | | | | | | | |
| $Au_1$ | 0 -24 | 130,0 | 30,0 | 175,0 | 1,26 | 1,14 | 15,0 | 10,7 | 0,71 | 0,50 |
| $Au_2$ | 24 -50 | 131,0 | 32,9 | 195,0 | 1,14 | 1,03 | 12,8 | 9,6 | 0,75 | 0,39 |
| P3 – Argissolo Amarelo Eutrófico típico, textura argilosa, A antrópico | | | | | | | | | | |
| $Aup_1$ | 0 – 22 | 226,0 | 45,3 | 280,0 | 1,37 | 1,24 | 28,4 | 9,5 | 0,33 | 0,63 |
| $Au_2$ | 22- 40 | 311,0 | 46,2 | 305,0 | 1,73 | 1,58 | 29,2 | 9,5 | 0,33 | 0,63 |
| AB | 40 -64 | 376,0 | 49,1 | 345,0 | 1,85 | 1,70 | 39,1 | 8,0 | 0,20 | 0,80 |
| BA | 64 -87 | 342,0 | 49,1 | 380,0 | 1,53 | 1,41 | 37,9 | 5,4 | 0,14 | 0,77 |
| $Bt_1$ | 87 -116 | 321,0 | 56,0 | 410,0 | 1,33 | 1,22 | 37,9 | 4,5 | 0,12 | 0,68 |
| $Bt_2$ | 116 -146+ | 314,0 | 63,0 | 425,0 | 1,26 | 1,15 | 37,3 | 4,9 | 0,13 | 0,59 |
| P4 – Cambissolo Háplico Ta Eutrófico léptico, textura siltosa, A antrópico | | | | | | | | | | |
| $Au_1$ | 0 – 22 | 123,0 | 47,0 | 165,0 | 1,27 | 1,07 | 22,0 | 12,1 | 0,55 | 0,47 |
| $Au_2$ | 22 - 44 | 116,0 | 47,0 | 180,0 | 1,10 | 0,94 | 27,0 | 16,4 | 0,61 | 0,57 |
| AC | 44 – 62 | 153,0 | 49,7 | 165,0 | 1,58 | 1,32 | 33,4 | 19,0 | 0,57 | 0,67 |
| CR/Bi | 62+ | 100,0 | 55,1 | 190,0 | 0,89 | 0,75 | 42,0 | 14,9 | 0,35 | 0,76 |
| P5 - Argissolo Amarelo Disrófico típico, textura argilosa, A antrópico | | | | | | | | | | |
| $Aup_1$ | 0 – 16 | 45,0 | 30,7 | 145,0 | 0,53 | 0,46 | 15,4 | 19,3 | 1,25 | 0,50 |
| $Au_2$ | 16- 35 | 60,0 | 23,1 | 140,0 | 0,73 | 0,66 | 17,5 | 22,4 | 1,28 | 0,76 |
| AB | 35 -58 | 57,0 | 30,2 | 150,0 | 0,65 | 0,57 | 17,5 | 21,6 | 1,23 | 0,58 |
| BA | 58 – 86 | 72,0 | 35,8 | 155,0 | 0,79 | 0,69 | 20,8 | 19,5 | 0,94 | 0,58 |
| $Bt_1$ | 86 – 110 | 74,0 | 33,6 | 160,0 | 0,79 | 0,69 | 22,0 | 17,5 | 0,80 | 0,65 |
| $Bt_2$ | 110 - 125 | 88,0 | 35,9 | 185,0 | 0,81 | 0,72 | 21,8 | 18,7 | 0,86 | 0,61 |
| P6 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura argilosa, A antrópico | | | | | | | | | | |
| $Au_1$ | 0 – 12 | 189,0 | 47,3 | 305,0 | 1,05 | 0,96 | 34,2 | 10,2 | 0,30 | 0,72 |
| $Au_2$ | 12 - 27 | 288,0 | 56,5 | 340,0 | 1,44 | 1,30 | 35,4 | 6,7 | 0,19 | 0,63 |
| BA | 27 – 44 | 278,0 | 51,8 | 370,0 | 1,28 | 1,17 | 36,0 | 5,5 | 0,15 | 0,69 |
| $Bt_1$ | 44 – 65 | 255,0 | 65,4 | 410,0 | 1,06 | 0,96 | 45,3 | 6,1 | 0,13 | 0,69 |
| $Bt_2$ | 65 - 89 | 258,0 | 64,5 | 415,0 | 1,06 | 0,96 | 44,5 | 5,8 | 0,13 | 0,69 |
| $Bt_3$ | 89 - 115+ | 296,0 | 65,4 | 425,0 | 1,18 | 1,08 | 43,2 | 5,7 | 0,13 | 0,66 |
| P7 - Argissolo Amarelo Eutrófico típico, textura argilosa, A antrópico | | | | | | | | | | |
| $Aup_1$ | 0 – 19 | 102,0 | 58,3 | 250,0 | 0,69 | 0,60 | 22,4 | 5,2 | 0,23 | 0,38 |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Au_2$ | 19 – 35 | 110,0 | 64,1 | 255,0 | 0,73 | 0,63 | 31,5 | 3,6 | 0,11 | 0,49 |
| AB | 35 – 64 | 157,0 | 69,7 | 310,0 | 0,86 | 0,75 | 22,9 | 1,9 | 0,08 | 0,33 |
| BA | 64 – 89 | 200,0 | 82,7 | 360,0 | 0,94 | 0,82 | 17,1 | 1,3 | 0,08 | 0,21 |
| $Bt_1$ | 89 – 121 | 125,0 | 74,9 | 350,0 | 0,61 | 0,53 | 28,6 | 0,8 | 0,03 | 0,38 |
| $Bt_2$ | 121 – 150 | 115,0 | 67,2 | 350,0 | 0,56 | 0,50 | 17,1 | 0,2 | 0,01 | 0,25 |

Horiz.; horizonte; Prof.: profundidade; (1) $Fe_d$: formas cristalinas extraídas por ditionito-citrato-bicarbonato. (2) $Fe_o$: formas de baixa cristalinidade, extraídas por oxalato ácido de amônio.

Tabela 4. Teores dos óxidos do ataque sulfúrico ($SiO_2$, $Fe_2O_3$, $Al_2O_3$), óxidos livre extraídos com ditionitocitrato-bicarbonato ($Fe_2O_3$) e formas amorfas extraídas com oxalato ácido de amônio ($Fe_2O_3$) e relações entre eles, em perfis de Terras Pretas Arqueológicas na região Sul do Estado do Amazonas.

Os valores da relação $Fe_o/Fe_d$ distribuíram-se de maneira semelhante nos perfis P3, P6 e P7 com valores da relação mais baixos, enquanto que os demais perfis (P1, P2, P4 e P5) exibiram relações mais elevadas. Este resultado deve-se, possivelmente, às maiores quantidades de matéria orgânica, combinadas com os maiores teores de umidade, dificultando assim, a cristalização dos óxidos de Fe para os perfis P3, P6 e P7 (Tabela 4). Segundo Demattê et al., (1994), à medida que os óxidos vão ficando menos cristalinos, em superfície, eles são mais facilmente removidos do solo e transportados para as partes mais baixas do terreno.

A relação ($Fe_d/Fe_t$) tem sido utilizada como indicador auxiliar do grau de desenvolvimento do solo, sendo maior nos solos mais intemperizados. No presente estudo verificou-se que os valores desta relação ($Fe_d/Fe_t$) são maiores nos perfis P3, P5 e P6 quando comparados a P1, P2 e P4 indicando que estes solos estão em estágio mais avançado de intemperismo.

## 3.4 Classificação dos solos

Com base no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2006), os quatro perfis foram classificados até o 4.° nível categórico, sendo utilizado para o 5.° nível o grupamento textural e tipo de horizonte A.

Dessa maneira, os solos foram assim classificados: P1 - Neossolo Litólico Distrófico típico, textura arenosa, A antrópico; P2 – Neossolo Litólico Distrófico típico, textura siltosa, A antrópico; P3 - Argissolo Amarelo Eutrófico típico, textura argilosa, A antrópico; P4 – Cambissolo Háplico Ta Eutrófico léptico, textura siltosa A antrópico; P5 - Argissolo Amarelo Disrófico típico, textura argilosa, A antrópico; P6 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura argilosa, A antrópico e P7 - Argissolo Amarelo Eutrófico típico, textura argilosa, A antrópico. As classes de solos encontradas são concordantes com as identificadas por Lima (2001), que afirma que as TPAs taxonomicamente enquadram-se nas ordens dos Argissolos, Latossolos, Cambissolos e Neossolos.

## 4 | CONCLUSÕES

Os fragmentos cerâmicos e material lítico apresentam-se quantidades e profundidades semelhantes no horizonte A dos perfis estudados, sugerindo certa similaridade dos fatores antrópicos que promoveram suas formações;

Os horizontes antrópicos dos perfis P3, P4 e P7 são de caráter eutrófico e apresentam teores altos a muito altos de fósforo disponível quando comparado aos perfis P1, P2, P5 e P6, evidenciando heterogeneidade das TPAs;

As TPAs foram adequadamente enquadradas nos diversos níveis categóricos do SiBCS.

## REFERÊNCIAS


BRASIL. **Ministério das Minas e Energia.** Projeto Radambrasil, folha SB. 20, Purus. Rio de Janeiro, 1978. 561 p.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A. & VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC.** Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106).

CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; RIBEIRO FILHO, M. R.; SOUZA, R. V. C. C. & ALMEIDA, M. C. Caracterização e Classificação de Terras Pretas Arqueológicas na região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, 70:18-27, 2011.

CAMPOS, M. C. C.; SANTOS, L. A. C.; SILVA, D. M. P.; MANTOVANELLI, B. C. & SOARES, M. D. R. Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. **R. Agro@mbiente On-line**, 6:102-109, 2012.

CORRÊA, G. R. **Caracterização pedológica de arqueoo-antropossolos no Brasil: sambaquis da Região dos Lagos (RJ) e Terras pretas de índio na região do baixo rio Negro/Solimões (AM).** Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2007, 115p. (Dissertação de Mestrado).

CPRM - **Centro de Pesquisa de Recursos Minerais. Hidroclimatologia, geologia, recursos minerais, geomorfologia e unidades de paisagens.** Manaus, 2001. 93p. (Relatório Técnico).

CPRM **- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL.** Base Cartográfica digital obtida pela CPRM, a partir da base cartográfica integrada digital do Brasil ao milionésimo elaborada pelo IBGE. 2005.

CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; CANELAS, L. P.; NOVOTNY, E. H.; MOUTTA, R. O.; TROMPOWSKY, P. & SANTOS, G. A. Fracionamento químico da matéria orgânica e características de ácidos húmicos de solos com horizonte A antrópico da Amazônia (Terra Preta). **Acta Amaz.,** 37:91-98, 2007.

DEMATTÊ, J. A. M.; ALOISI, R. R.; DEMATTE, J.L.I. Sequência Latossolo Amarelo - Podzólico Amarelo - Areias Quartzosas sob material da formação barreiras na região de Tucuruí, Estado do Pará. **Sci. Agric.**, 51:345-356, 1994.

DENEVAN, W.M. A bluff model of riverine settlement in prehistoric Amazonia. **In: Annals of the American Geographers**, 1996. p.654–681.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, 2006. 354p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos análise de solo**. Rio de janeiro, 1979. 247p.

FALCÃO, N. P. S.; CARVALHO, E. J. M. & COMERFORD, N. Avaliação da fertilidade de solos antropogênicos da Amazônia Central. In: **Congresso da Sociedade de Arqueologia Brasileira, XI.** Grupo de trabalho: Terras Pretas Arqueológicas na Amazônia: Estado da Arte. Rio de Janeiro, 2001.. 2p.

FALCAO, N. P. S.; MOREIRA, A.; COMERFORD, N. B. & LEHMANN, J. Fertilidade do solo de Terra Preta de Índio. Em: TEIXEIRA, W. G., KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N. &WOODS, W. I. (Org.). **As Terras Pretas de Índio da Amazônia -- Sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. 1ª Ed. Manaus: UFAM, 2009, p. 201-211.

FRASER, J.A. & CLEMENT, C.R. Dark Earths and manioc cultivation in Central Amazonia: a window on pre-Columbian agricultural systems? Bol. Mus. Pará **Emilio Goeldi Cien**. Hum., 3:175-194, 2008.

GERMAN, L. A. Historical contingencies in the coevolution of environment and livelihood: contributions to the debate on Amazonian Black Earth. **Geoderma**, 111:307–331, 2003.

GLASER, B. Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century**. Phil Trans R**. Soc. B. 362:187–196, 2007.

GLASER, B.; BALASHOV, E.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G. & ZECH, W. **Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region.** Org. Geo, 31:669-678, 2000.

JACOMINE, P. K. T. Origem e evolução dos conceitos e definições de atributos, horizontes diagnósticos e das classes de solos do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). Em: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L. R. F.; COOPER, M.; SILVA, A. P. da; & CARDOSO, E. J. (Ed.) Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2005, p.193-231.

KÄMPF, N. & KERN, D. C. **O solo como registro da ocupação humana pré-histórica na Amazônia**. Em: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L. R. F.; COOPER, M.; SILVA, A.P. & CARDOSO, E. J. (Org.). **Tópicos em Ciência do solo.** 1 ed. Viçosa: SBCS, 2005, p.277-320.

KERN, D. C. & KÄMPF, N. O efeito de antigos assentamentos indígenas na formação de solos com terra preta arqueológicas na região de Oriximiná – PA. **R. Bras. C. Solo**. 13:219-225, 1989.

KERN, D.C. **Geoquímica e pedoquímica de sítios arqueológicos com Terra Preta na Floresta de Caxiuaná (Portel-Pará).** Belém, Universidade Federal do Pará, 1996, 124p. (Tese de Doutorado).

LEHMANN, J.; KERN, D.C.; GERMAN, L.A.; MCCANN, J.; MARTINS, G.C. & MOREIRA, A. Soil fertility and production potential. Em: LEHMANN, J., KERN, D.C., GLASER, B. & WOODS, W.I. (Ed.). Amazonian dark earths; origin, properties and management. **Dordrecht: Kluwer Academic Publishers,** 2003. p.105-124.

LIMA, H. N**. Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de solos da Amazônia Ocidental.** Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2001, 176p. (Tese de Doutorado).

LIMA, H. N.; SCHAEFER, C. E. R.; MELLO, J. W. V.; GILKES, R. J. & KER, J. C. Pedogenesis and pre-Columbian land use of "Terra Preta Anthrosols" ("Indian black earth") of Western Amazonia. **Geoderma.** 110:1–17, 2002.

MARQUES JÚNIOR, J. **Distribuição e atributos dos solos em relação à forma e evolução de uma vertente em Monte Alto, SP.** Piracicaba. Escola Superior "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1995. 226p. (Tese de Doutorado).

MEHRA, O. P. & JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: NATIONAL CONFERENCE ON CLAYS AND CLAyS MINERALS, 7., Washington, 1960. **Proceedings... New york,** 1960. p.317-327.

NEVES JUNIOR, A. F. **Qualidade física de solos com horizonte antrópico (Terra Preta de Índio) na Amazônia Central.** Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2008, 94p. (Tese de Doutorado).

NEVES, E. G.; PETERSON, J. B; BARTONE, R.N. & SILVA, C. A. Historical and socio-cultural origins of Amazonian darck earths. Em: LEHMAN, J.; KERN, D.C.; GLASER, B. & WOODS, W.I. Amazonian darck earths; origin, properties and management, 1 **Dordrecht: Kluwer Academic Publishers,** 2003. p. 29-50.

NOVOTNY, E. H.; DEAZEVEDO, E. R.; BONAGAMBA, T. J.; CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M. & HAYES, M. H. B. Studies of the compositions of humic acids from Amazonian dark earth soils. **Environ. Sci. Technol.** 41:400-405, 2007.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. & CANTARELLA, H. **Análise química do solo para fins de fertilidade.** Campinas, Fundação Cargill, 1987. 107p.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; ANJOS, L.H**. Manual de descrição e coleta de solos no campo.** 5. ed. Viçosa. SBCS, 2005. 100p.

SDS - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Relatório técnico síntese dos diagnósticos: Área estadual sul de Apuí e Manicoré.** Manaus, 2004. 20p.

SMITH, N. J. H. Anthrosol and human carrying capacity in Amazonia . **In: ANNALS OF THE ASSOCIATION OF AMERICAN GEOGRAPHERS,** 70. 1980, Durham. Annais.. Durham, 1980. p. 553-566.

SMITH, N. J. H. Anthrosols and human carrying capacity in Amazonia. Annals of the Association of **American Geographers.** 70:553-566, 1980.

STEINBEISS, S.; GLEIXNER, G. & ANTONIETTI, M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. **Soil Biol. Biochem**. 41:1301-1310, 2009.

STEINER, C.; TEIXEIRA, W.G.; LEHMANN, j. & ZECH, W. Microbial response to charcoal amendments of highly weathered soils and Amazonian dark earths in Central Amazonia – preliminary results. Em: GLASER, B. & WOODS, W.I. (Ed.). Amazonian dark earths: explorations in space and time. **New York: Springer,** 2004. p.195-212.

YEOMANS, J. C. & BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil**. Comm. Soil Sci. Plant Anal.** 19:1467-1476, 1988.

# CAPÍTULO 2

# CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DE TERRAS PRETAS ARQUEOLÓGICAS E DE SOLOS NÃO ANTROPOGÊNICOS NA REGIÃO DE MANICORÉ, AM

*Data de aceite: 18/05/2021*
*Data de submissão: 11/05/2021*

**Milton César Costa Campos**
Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal da Paraíba
Areia - Paraíba
https://orcid.org/0000-0002-8183-7069

**Luís Antônio Coutrim dos Santos**
Universidade do Estado do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://lattes.cnpq.br/3309448267226921

**Douglas Marcelo Pinheiro da Silva**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://lattes.cnpq.br/6219916883682579

**Bruno Campos Mantovanelli**
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/2388955631974062

**Marcelo Dayron Rodrigues Soares**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://lattes.cnpq.br/7077741895593598

**José Maurício da Cunha**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://lattes.cnpq.br/3425545536495518

**RESUMO:** Os solos predominantes na região Amazônica pertencem à classe dos Latossolos e Argissolos, caracterizado por seu alto grau de intemperismo e baixa fertilidade natural, em contraste, ocorrem às terras pretas arqueológicas com elevada fertilidade natural e alto teor de matéria orgânica. Objetivou-se com este estudo caracterizar quanto aos atributos físicos e químicos as terras pretas arqueológicas e os solos não antropogênicos da região de Manicoré, AM. Foram amostrados quatro sítios de Terras Pretas Arqueológicas e quatro solos não antropogênicos distribuídos na região de Manicoré, sul do Amazonas. Nesses locais foram abertas trincheiras e os perfis foram caracterizados morfologicamente e coletados por horizonte. Foram realizadas análises físicas (textura e densidade do solo) e químicas (pH em água, Ca2+, Mg2+, K+, Al3+ trocáveis, P disponível, e C orgânico). Os valores de pH, carbono orgânico, soma de bases e V% das terras pretas arqueológicas foram superiores aos observados para solos não antropogênicos da região de Manicoré, AM. Os solos não antropogênicos apresentaram maiores valores de densidade do solo quando comparados às áreas de terra preta arqueológica. Os maiores teores de matéria orgânica do solo foram encontrados nas áreas de terra preta arqueológica. As terras pretas arqueológicas deste estudo apresentam atributos químicos e físico-químicos superiores aos solos não antropogênicos, conferindo-lhes maior fertilidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** A antrópico, Sítios Arqueológicos, Solos amazônicos.

## PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERIZATION OF ARCHAEOLOGICAL DARK EARTHS AND NONANTHROPOGENIC SOILS THE MANICORE, REGION, AMAZON

**ABSTRACT:** The predominant soils in the Amazon region belong to the class of Oxisols and Ultisols, characterized by its high degree of weathering and low natural fertility, in contrast, occur at Archaeological Dark Earths soils with high fertility and high organic matter content. The aim of this study was the physical and chemical characterization of archaeological dark earths and non-anthropogenic soils in the southern Amazon. Four archaeological sites with dark earths and four non-anthropogenic soils distributed in the Manicoré region, souther Amazon, were sampled. In these locations, open trenches and profiles were characterized morphologically and collected by horizon. Physical (texture and bulk density) and chemical (pH, Ca, Mg, K, and Al, P, and organic C) analyses were realized. The values of pH, organic carbon, total bases and V% in archaeological dark earths were higher than those observed in the non-anthropogenic soils the Manicore, Amazon region. The non-anthropogenic soils showed higher bulk density compared to areas of archaeological dark earths. The highest levels of soil organic matter were found in areas of archaeological dark earths. The archaeological dark earths of this study show the chemical and physicchemical above the non-anthropogenic soils, giving them more fertile.
**KEYWORDS**: Antropic A, Archaeological sites, Amazonian soils.

## 1 I INTRODUÇÃO

Os solos predominantes na região Amazônica pertencem à classe dos Latossolos e Argissolos, sendo estes caracterizados por seu alto grau de intemperismo, possuindo características físicas adequadas ao uso agrícola, no entanto com fortes limitações nutricionais (LIMA *et al.,* 2006). A maior parte dos solos agricultáveis desta região é de reação ácida, com baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e baixa fertilidade (CUNHA *et al.*, 2007).

A fertilidade dos solos em ecossistemas naturais da Amazônia é dependente do aporte de nutrientes presentes na atmosfera, decomposição da biomassa e ação do intemperismo. Destacando a decomposição dos resíduos vegetais que é essencial à nutrição da biota do solo e das plantas (RUIVO *et al.*, 2005).

Em meio à vasta região Amazônica ocorrem áreas onde a característica original do solo foi modificada por processos antrópicos, tais solos são conhecidos como terra preta arqueológica (TPA) ou terra preta de índio, podendo ser comumente encontrados na paisagem amazônica (COSTA *et al.,* 2004). As áreas de TPA apresentam como

característica marcante alta fertilidade natural (GLASER, 2007), coloração escura e a presença de fragmentos de cerâmica e artefatos indígenas incorporados à matriz dos horizontes superficiais do solo (CAMPOS *et al.* 2011).

A elevada fertilidade e principalmente a sustentabilidade da fertilidade das áreas de TPA é atribuída ao elevado nível de matéria orgânica e as suas propriedades físico-químicas como, a elevada reatividade das frações húmicas (CUNHA *et al.* 2009). Os vegetais são os principais responsáveis pela adição ao solo de compostos orgânicos primários sintetizados no processo de fotossíntese, que dependendo da quantidade de resíduos depositados no solo poderá resultar em aumento no teor de carbono orgânico (CO) do solo (FARIA *et al.*, 2008). Lima *et al.* (2002) verificaram que as áreas de TPA apresentam altos teores totais de Ca e P, matéria orgânica, intensa atividade biológica, pH em torno de 5,2 a 6,4; P disponível, em geral, acima de 250 mg $kg^{-1}$, Zn e Mn acima de 200 e 450 mg $kg^{-1}$, respectivamente.

German (2003) assegura que as áreas de TPA são encontradas adjacentes aos cursos de água, ocupando áreas de várzeas, elevações marginais, com expansão variando de um a centenas de hectares, ao longo de rios e interflúvios e localizadas em posição topográfica que comporte boa visualização espacial.

A matéria orgânica do solo (MOS) é toda fração orgânica presente no mesmo em forma de detrito fresco ou em distintos estágios de decomposição, compostos humificados e materiais queimados, associados ou não à fração mineral e outra parte composta por organismos vivos como raízes e os constituintes da fauna edáfica (NEVES JÚNIOR, 2008). Para Fraser e Clemente (2008), a matéria orgânica do solo é considerada uma fonte primária de nutrientes às plantas, o conteúdo desta no solo é um dos principais indicadores de sustentabilidade e qualidade do mesmo. Sendo assim, objetivou-se com este estudo caracterizar os atributos físicos e químicos de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, AM.

## 2 I MATERIAL E MÉTODOS

As áreas de estudo localizam-se na região Sul do Amazonas (Figura 1), de acordo com Brasil (1978), as áreas de estudo estão situadas na mesma zona climática, segundo a classificação de Köppen, pertencendo ao grupo A (Clima Tropical Chuvoso) e tipo climático Am (chuvas do tipo monção), apresentando uma época seca de pequena duração. A pluviosidade é limitada entre 2.250 e 2.750 mm, com período chuvoso iniciando em outubro e prolongando-se até junho. As temperaturas médias anuais se alteram entre 25°C e 27°C e a umidade relativa do ar varia entre 85 e 90% (Brasil, 1978).

As áreas de estudos estão distribuídas na região de Manicoré, AM, às margens da BR 230 - Transamazônica, sentido Apuí-AM. O relevo é caracterizado pela presença de platôs, nas partes mais elevadas, combinada com áreas rebaixadas de sopé. Os platôs apresentam superfícies topográficas planas, sendo a zona de borda marcada por colinas

e cristas alinhadas, enquanto as áreas de planícies têm características de superfície pediplanada, localmente interrompida por colinas de topo plano (CPRM, 2001).

Com relação à geologia, a região localiza-se sobre saprolitos de Granitos Rondonianos, que se caracterizam por apresentar muscovita, biotita, adamelitos e granodioritos, de origem intrusiva cratogênica, em forma de "stocks" e batólitos (Brasil, 1978). De acordo com o ZEE-Sul-Sudeste do Amazonas (2008), os solos presentes na região são os Latossolos Amarelos e Vermelho-Amarelos. A vegetação característica dessa região é a Floresta Tropical Densa, formada por árvores adensadas e multiestratificadas de 20 a 50 m de altura, com clima úmido, elevadas temperaturas e alta precipitação.

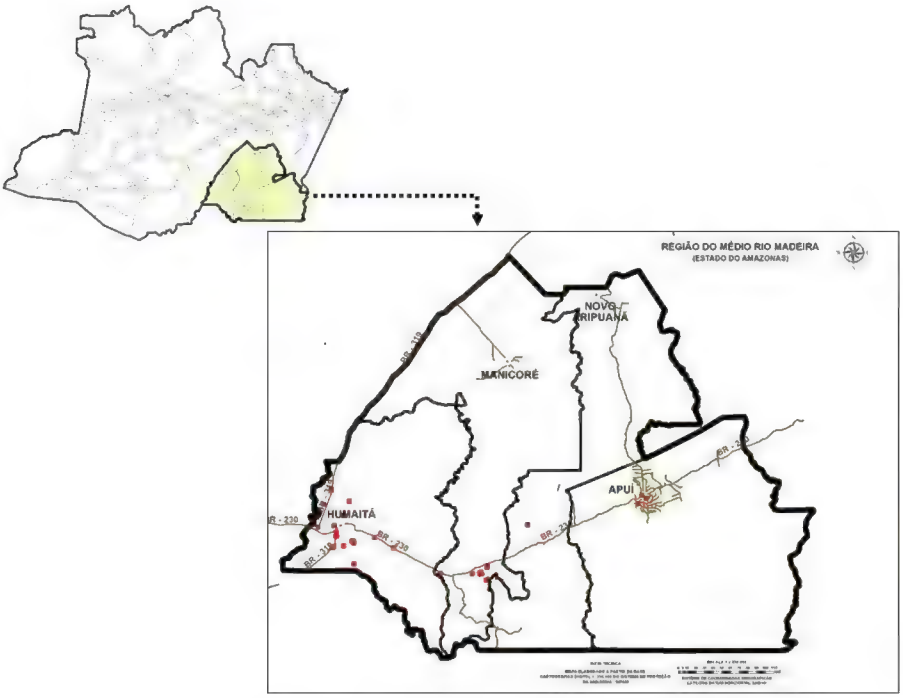



Figura 1. Mapa da região Sul do Amazonas.

Fonte: SANTOS (2011)

Foram amostrados quatro sítios de terras pretas arqueológicas (TPA) e quatro áreas de solos não antropogênicos (SNA) na região de Manicoré, Sul do Estado do Amazonas (Figura 2). Estabeleceu-se um caminhamento pelas áreas para a escolha do local de abertura da trincheira e coleta dos solos. Os locais de amostragem foram definidos em função se sua posição central em relação à mancha de TPA e essa mesma regra valeu para os SNA. A identificação dos horizontes foi realizada conforme Santos *et al.* (2005), com coleta de amostras por horizontes.

As análises físicas e químicas foram realizadas de acordo com Embrapa (1997). A textura foi determinada pelo método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH 0,1 N como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de alta rotação por 10 min. A fração argila foi separada por sedimentação; as areias, grossa e fina, por tamisação; e o silte, calculado por diferença. A densidade do solo foi obtida pelo método do anel volumétrico, e a densidade das partículas, pelo método do balão volumétrico.

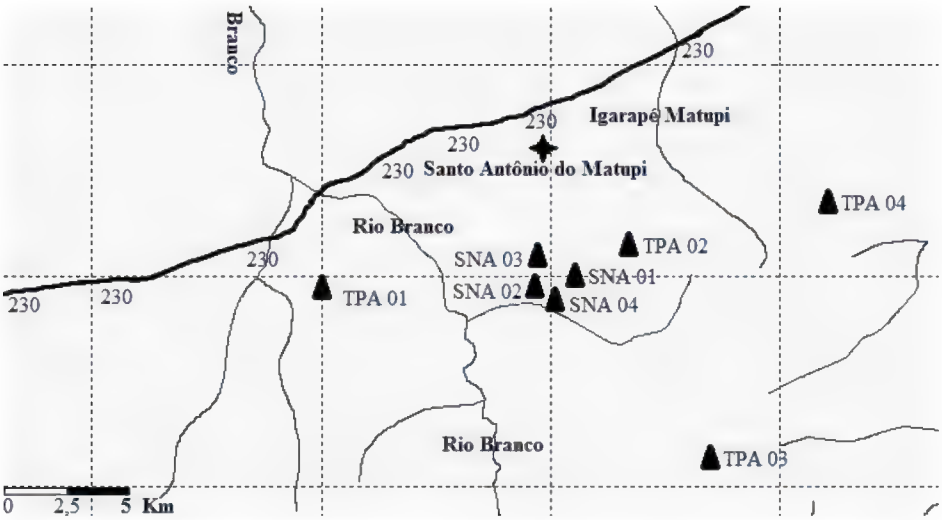



Figura 2 - Mapa da localização das áreas de terras pretas arqueológicas (TPA) e solos não antropogênicos (SNA) na região de Manicoré, AM.

Fonte: SANTOS (2011)

Nas análises químicas foram determinados Ca2+, Mg2+, K+, Al3+, Na2+ trocáveis, P disponível e a acidez potencial (H + Al). Com base nos resultados das análises químicas, foram calculadas a soma de bases (SB), a capacidade de troca catiônica (T) e a saturação por bases (V %). O pH foi determinado potenciometricamente, utilizando-se relação 1:2,5 de solo, em água. O C orgânico total foi determinado pelo método de oxidação via úmida, com aquecimento externo (YEOMANS; BREMNER, 1988).

## 3 I RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os atributos físicos do solo das áreas não antropogênicos (SNA) e das terras pretas arqueológicas (TPA). As frações granulométricas das áreas de SNA apresentaram comportamento semelhante entre si, com predomínio da fração argila, em função do material de origem (Tabela 1). Segundo Teramoto *et al.* (2001) a geologia fornece subsídios que ajudam explicar o comportamento físico e químico do solos. Já nas áreas de TPA verificou-se dominância da fração areia, em particular da fração areia

grossa no horizonte antrópico em todos os perfis estudados. Entretanto, nos horizontes diagnósticos subsuperficiais, excetuando-se o do TPA2, que tem influência de materiais coluviais, houve predomínio da fração argila.

| Solos | Horizonte | Profundidade (cm) | Granulometria (g kg$^{-1}$) | | | | Ds (g cm$^{-3}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Areia Grossa | Areia Fina | Silte | Argila | |
| SNA1 | A | 0-16 | 195,50 | 97,82 | 137,48 | 569,20 | 1,06 |
| | AB | 16-35 | 169,14 | 96,13 | 156,13 | 578,60 | 1,11 |
| | BA | 35-67 | 85,69 | 93,51 | 146,00 | 674,80 | 1,00 |
| | $Bw_1$ | 67-120 | 86,82 | 89,67 | 171,41 | 652,10 | 0,99 |
| | $Bw_2$ | 120-150 | 85,04 | 89,00 | 177,46 | 648,50 | 1,08 |
| SNA2 | A | 0-28 | 232,73 | 227,46 | 135,12 | 404,69 | 1,29 |
| | AB | 28-57 | 226,53 | 241,67 | 130,20 | 401,60 | 1,52 |
| | $Bt_1$ | 57-82 | 102,20 | 103,00 | 170,50 | 624,30 | 1,38 |
| | $Bt_2$ | 82-120 | 89,73 | 100,47 | 155,70 | 654,10 | 1,30 |
| SNA3 | A | 0-18 | 75,51 | 89,69 | 230,80 | 604,00 | 1,38 |
| | BA | 18-42 | 129,37 | 85,83 | 231,70 | 553,10 | 1,38 |
| | $Bw_1$ | 42-71 | 104,74 | 80,46 | 211,80 | 603,00 | 1,40 |
| | $Bw_2$ | 71-103 | 100,56 | 74,64 | 222,50 | 602,30 | 1,39 |
| | $Bw_3$ | 103-170 | 113,87 | 81,33 | 204,60 | 600,20 | 1,38 |
| SNA4 | A | 0-22 | 128,88 | 126,32 | 120,00 | 624,80 | 1,27 |
| | BA | 22-47 | 83,71 | 91,49 | 110,00 | 714,80 | 1,11 |
| | $Bw_1$ | 47-77 | 115,43 | 99,77 | 80,00 | 704,80 | 1,09 |
| | $Bw_2$ | 77-107 | 66,78 | 68,42 | 120,00 | 744,80 | 1,12 |
| | $Bw_3$ | 107-145 | 85,89 | 69,31 | 100,00 | 744,80 | 1,20 |
| TPA1 | $A_1$ | 0-19 | 232,49 | 148,50 | 448,41 | 170,60 | 0,76 |
| | $A_2$ | 19-37 | 267,31 | 152,52 | 343,57 | 236,60 | 0,84 |
| | $Bt_1$ | 37-70 | 123,08 | 95,24 | 260,99 | 520,70 | 0,99 |
| | $Bt_2$ | 70-100 | 105,11 | 91,95 | 248,04 | 554,90 | 1,04 |
| | BC | 100-120 | - | - | - | - | - |
| TPA2 | $A_1$ | 0-32 | 528,21 | 138,53 | 146,57 | 186,70 | 1,02 |
| | $A_2$ | 32-50 | 564,60 | 171,05 | 104,76 | 159,60 | 1,11 |
| | AB | 50-75 | 534,38 | 173,88 | 99,75 | 192,00 | nd |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Bt | 75-105+ | 447,47 | 117,49 | 80,54 | 354,50 | nd |
| TPA3 | $A_1$ | 0-20 | 577,37 | 106,89 | 140,15 | 175,60 | 1,05 |
| | $A_2$ | 20-40 | 553,29 | 144,32 | 128,80 | 173,60 | 1,29 |
| | BA | 40-70 | 352,47 | 127,42 | 144,11 | 376,00 | 1,51 |
| | $Bt_1$ | 70-110 | 221,50 | 73,47 | 140,23 | 564,80 | 1,41 |
| | $Bt_2$ | 110-150+ | 229,33 | 69,76 | 115,61 | 585,30 | - |
| TPA4 | $A_1$ | 0-20 | 235,51 | 104,09 | 247,31 | 413,10 | 0,84 |
| | $A_2$ | 20-42 | 277,09 | 94,61 | 280,01 | 348,30 | 0,85 |
| | AB | 42-63 | 195,12 | 103,63 | 306,65 | 394,60 | 1,03 |
| | BA | 63-108 | 155,52 | 61,79 | 182,59 | 600,10 | 1,12 |
| | $Bt_1$ | 108-153 | 121,23 | 53,30 | 188,77 | 636,70 | 1,15 |
| | $Bt_2$ | 153-170 | 121,10 | 52,73 | 145,38 | 680,80 | - |

SNA1 - Latossolo Vermelho Distrófico típico; SNA2 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abrúptico; SNA3 - Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico; SNA4 - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico.

TPA1 - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico abrúptico; TPA2 – Argissolo Acinzentado Eutrófico típico; TPA3 – Argissolo Amarelo Eutrófico abrúptico e TPA4 – Argissolo Amarelo Eutrófico típico.

Tabela 1 - Atributos físicos de solos não antropogênicos (SNA) e de terras pretas arqueológicas (TPA) na região de Manicoré, AM

Os valores de densidade do solo (Ds) nas áreas de SNA variaram entre 0,99 a 1,52 g $cm^{-3}$ (Tabela 1). Já nas áreas de TPA os valores da densidade do solo apresentaram valores mais baixos para os horizontes antropogênicos em todos os perfis estudados, e estes valores tendem aumentar com a profundidade. Segundo Neves Júnior (2008) os resultados de baixas densidades do solo são resultantes dos elevados teores de carbono.

Na Tabela 2, observou-se que os valores de pH em água variam de 4,0 e 5,1, nos SNA, apresentando acidez muito elevada a acidez média. Resultados de pH em água foram semelhantes aos encontrados por Campos *et al.* (2012) que estudou áreas de campos nativos cultivada com mandioca na região de Humaitá (AM).

| Solos | [2]Hor. | **Prof** | pH | C | P | Ca2+ | Mg2+ | K+ | Al3+ | SB | CTC | V |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **cm** | $H_2O$ | g $kg^{-1}$ | mg $kg^{-1}$ | | | $cmol_c$ $kg^{-1}$ | | | | % |
| SNA1 | A | 0-16 | 4,6 | 24,8 | 0,2 | 0,8 | 0,6 | 0,1 | 0,9 | 1,6 | 11,1 | 14,1 |
| | AB | 16-35 | 4,6 | 12,8 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,0 | 0,6 | 0,7 | 9,4 | 8,2 |
| | BA | 35-67 | 4,5 | 7,5 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,0 | 0,4 | 0,6 | 7,1 | 8,3 |
| | $Bw_1$ | 67-120 | 4,8 | 5,1 | 0,3 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,5 | 4,8 | 9,6 |
| | $Bw_2$ | 120-150 | 5,1 | 4,1 | 0,6 | 0,5 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,5 | 5,8 | 8,7 |
| SNA2 | A | 0-28 | 4,5 | 10,1 | 2,9 | 0,9 | 0,4 | 0,1 | 0,4 | 1,5 | 4,6 | 33,5 |
| | AB | 28-57 | 5,0 | 5,2 | 0,8 | 0,9 | 0,1 | 0,1 | 0,4 | 1,3 | 4,9 | 25,8 |
| | $Bt_1$ | 57-82 | 4,0 | 5,8 | 1,3 | 0,8 | 0,1 | 0,1 | 0,9 | 1,1 | 4,3 | 24,9 |
| | $Bt_2$ | 82-120 | 5,0 | 4,6 | 0,9 | 0,7 | 0,1 | 0,0 | 0,4 | 1,0 | 2,2 | 44,3 |
| SNA3 | A | 0-18 | 5,1 | 6,4 | 1,6 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 0,4 | 0,8 | 2,1 | 37,4 |
| | BA | 18-42 | 4,7 | 4,0 | 1,2 | 1,1 | 0,1 | 0,0 | 0,7 | 1,4 | 2,8 | 47,8 |
| | $Bw_1$ | 42-71 | 4,9 | 3,2 | 0,8 | 1,3 | 0,1 | 0,0 | 0,5 | 1,6 | 3,1 | 52,1 |
| | $Bw_2$ | 71-103 | 4,8 | 2,4 | 1,4 | 0,9 | 0,1 | 0,0 | 0,4 | 1,3 | 2,5 | 51,0 |
| | $Bw_3$ | 103-170 | 5,0 | 1,7 | 1,3 | 0,2 | 0,1 | 0,0 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 35,0 |
| SNA4 | A | 0-22 | 4,2 | 10,6 | 3,4 | 0,6 | 0,0 | 0,1 | 1,1 | 0,8 | 5,5 | 14,3 |
| | BA | 22-47 | 4,6 | 8,8 | 1,4 | 0,7 | 0,0 | 0,0 | 0,7 | 0,9 | 4,4 | 21,3 |
| | $Bw_1$ | 47-77 | 4,6 | 5,5 | 1,0 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 0,8 | 0,7 | 4,2 | 17,1 |
| | $Bw_2$ | 77-107 | 4,8 | 4,8 | 1,6 | 0,6 | 0,1 | 0,0 | 0,7 | 0,8 | 3,2 | 24,5 |
| | $Bw_2$ | 107-145 | 4,6 | 3,8 | 1,1 | 0,7 | 0,1 | 0,0 | 0,4 | 0,9 | 3,0 | 30,3 |

Hor. – Horizonte; Prof. – Profundidade; SNA1 - Latossolo Vermelho Distrófico típico; SNA2 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abrúptico; SNA3 - Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico; SNA4 - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico.

Tabela 2 - Atributos químicos de solos não antropogênicos (SNA) na região de Manicoré, AM.

Para as áreas de TPA os valores de pH em água nos horizontes antropogênicos variaram de 5,5 a 7,0 (Tabela 3). Os resultados de pH encontrados são distintos dos citados por Falcão; Borges (2006) que variam de 4,32 a 6,61. A amplitude entre os limites de pH evidencia a heterogeneidade química das áreas de TPA, oriundas seja das condições pedoambientais ou das atividades humanas em cada local.

| Solos | [2]Hor. | Prof | pH | C | P | Ca2+ | Mg2+ | K+ | Al3+ | SB | CTC | V |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | cm | $H_2O$ | g $kg^{-1}$ | mg $kg^{-1}$ | | | $cmol_c$ $kg^{-1}$ | | | | % |
| | $A_1$ | 0-19 | 7,0 | 77,3 | 143,5 | 9,3 | 4,9 | 0,1 | 0,1 | 14,5 | 19,25 | 75,12 |
| | $A_2$ | 19-37 | 6,5 | 62,4 | 230,7 | 5,3 | 3,6 | 0,1 | 0,2 | 9,2 | 14,86 | 61,69 |
| TPA1 | $Bt_1$ | 37-70 | 5,8 | 19,2 | 23,8 | 6,8 | 2,3 | 0,0 | 0,2 | 9,4 | 13,15 | 71,15 |
| | $Bt_2$ | 70-100 | 5,6 | 18,0 | 11,5 | 3,4 | 1,9 | 0,0 | 0,2 | 5,6 | 7,74 | 72,28 |
| | BC | 100-120 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | $A_1$ | 0-32 | 6,1 | 80,4 | 15,5 | 26,6 | 3,2 | 0,1 | 0,1 | 29,9 | 39,02 | 76,53 |
| | $A_2$ | 32-50 | 6,0 | 45,9 | 16,9 | 14,4 | 1,4 | 0,0 | 0,1 | 15,9 | 25,84 | 61,37 |
| TPA2 | AB | 50-75 | 5,9 | 34,1 | 13,4 | 6,3 | 1,1 | 0,0 | 0,1 | 7,5 | 11,23 | 66,95 |
| | Bt | 75-105+ | 5,6 | 19,5 | 6,1 | 2,6 | 0,6 | 0,0 | 0,1 | 3,2 | 5,91 | 53,97 |
| | $A_1$ | 0-20 | 6,0 | 71,1 | 35,4 | 25,3 | 0,8 | 0,2 | 0,2 | 26,4 | 33,53 | 78,59 |
| | $A_2$ | 20-40 | 5,9 | 56,8 | 26,1 | 13,3 | 0,5 | 0,0 | 0,2 | 13,8 | 22,68 | 61,07 |
| TPA3 | BA | 40-70 | 5,9 | 18,0 | 15,7 | 6,9 | 0,4 | 0,0 | 0,2 | 7,5 | 11,38 | 65,92 |
| | $Bt_1$ | 70-110 | 5,6 | 5,4 | 8,4 | 2,7 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 3,2 | 6,23 | 50,99 |
| | $Bt_2$ | 110-150+ | 5,7 | 4,5 | 1,7 | 2,4 | 0,5 | 0,0 | 0,1 | 3,0 | 5,71 | 52,32 |
| | $A_1$ | 0-20 | 6,0 | 43,8 | 25,7 | 14,7 | 1,2 | 0,0 | 0,1 | 16,0 | 27,13 | 58,95 |
| | $A_2$ | 20-42 | 6,1 | 44,1 | 24,0 | 13,6 | 1,8 | 0,0 | 0,1 | 15,5 | 26,12 | 59,26 |
| TPA4 | AB | 42-63 | 5,8 | 28,2 | 14,0 | 9,6 | 0,2 | 0,0 | 0,1 | 9,9 | 19,18 | 51,40 |
| | BA | 63-108 | 5,7 | 18,4 | 11,9 | 4,7 | 0,2 | 0,0 | 0,1 | 5,0 | 10,87 | 46,13 |
| | $Bt_1$ | 108-153 | 5,5 | 10,9 | 8,8 | 1,9 | 0,2 | 0,0 | 0,1 | 2,3 | 6,66 | 34,30 |
| | $Bt_2$ | 153-170 | 5,5 | 8,1 | 1,2 | 1,5 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 1,6 | 5,17 | 31,40 |

Hor. – Horizonte; Prof. – Profundidade; TPA1 - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico abrúptico; TPA2 – Argissolo Acinzentado Eutrófico típico; TPA3 – Argissolo Amarelo Eutrófico abrúptico e TPA4 – Argissolo Amarelo Eutrófico típico.

Tabela 3 - Atributos químicos das terras pretas arqueológicas (TPA) na região de Manicoré, AM

Os valores de pH em água das áreas de solos não antropogênicos (SNA) são inferiores aos das áreas de TPA (Tabelas 2 e 3). Esses resultados são corroborados com outros trabalhos realizado na região Amazônica, que mostram que geralmente o pH em áreas de TPA são mais elevados do que em comparação a solos não antropogênicos na região amazônica (LIMA *et al.* 2002; CUNHA *et al.* 2009; CAMPOS *et al.* 2011).

De acordo com Reis *et al.* (2009) a principal causa dos baixos valores de pH nos solos da região amazônica é a elevada perda de bases trocáveis e consequente concentração de íons $H^+$ ao solo, provocada pelo processo de intemperismo influenciado pelas altas temperaturas e longos períodos de precipitação.

Os maiores valores de pH observados nos sítios de TPA em comparação aos solos não antropogênicos, provavelmente, são devidos aos maiores teores de cátions, especialmente cálcio e magnésio e o baixo teor de alumínio (Tabela 3). Outro fator que pode explicar os maiores valores de pH nos sítios de TPA é a presença de carvão. Oguntunde

*et al.* (2004) observou um aumento no pH do solo, após a queima parcial de carvão, em consequência do aumento do nível de cátions trocáveis que este material disponibilizou ao solo.

Os teores de carbono orgânico dos sítios de TPA foram superiores aos dos SNA (Tabelas 2 e 3), estes resultados são corroborados por Cunha *et al.* (2007) que encontraram maiores teores de carbono nos horizontes A de solos antropogênicos da Amazônia. De acordo com Moreira (2007), a capacidade de manter o alto teor de carbono orgânico ocorre, possivelmente, devido às características químicas e da resistência do material à decomposição microbiana.

Os elevados teores de carbono orgânico nas áreas de TPA são atribuídos às alterações antrópicas que este solo sofreu em sua formação. Falcão e Borges (2006) relata que as áreas de TPA apresentam elevados teores de matéria orgânica e mais intensa atividade biológica que os solos não antropogênicos, os autores ainda afirmam que estes valores elevados podem ser provenientes de restos de ossos humanos e de animais.

Quanto aos teores de P disponível, verificou-se que todos os solos não antropogênicos (SNA) apresentam teores muito baixos (Tabela 2). Para as áreas de TPA os teores de fósforo disponível foram elevados nos horizontes antropogênicos, entretanto houve diferenças entre os perfis estudados, variando de 15,49 a 230,7 mg $kg^{-1}$. Estes valores são superiores aos encontrados nos horizontes subsuperficiais (Tabela 3), visto que são provenientes da incorporação de detritos pelos antigos habitantes, corroborados, assim, com os resultados encontrados por Ribeiro (2006).

Os teores de cálcio e magnésio trocáveis nos solos não antropogênicos foram baixos quando comparados às áreas de terras pretas arqueológicas (Tabelas 2 e 3). Os valores de cálcio e magnésio trocáveis nas terras pretas arqueológicas foram superiores aos encontrados nas áreas de SNA, apresentando maior concentração nos horizontes superficiais, o que está de acordo com Steinbeiss *et al.* (2009). Esses autores afirmaram que áreas de TPA apresentam elevados níveis de nutrientes, principalmente Ca e P, altos teores de matéria orgânica e atividade biológica mais elevada que os solos adjacentes. Além disso, verificou-se nesse estudo que os teores de Ca e Mg variaram entre as áreas de TPA estudadas, o que pode ser reflexo da variação do tempo e da densidade da ocupação humana nas áreas.

Os teores de potássio tanto nas áreas de SNA quanto nas de TPA foram baixos, estando de acordo com os resultados encontrados por Lehmann *et al.* (2003b). Os teores de $Al^{3+}$ trocável foram baixos em todos os horizontes das terras pretas arqueológicas (Tabela 3) quando comparados às áreas de SNA, assemelhando-se aos observados por Ribeiro (2006).

Verificou-se que os maiores valores de soma de bases foram observados nos horizontes antropogênicos. Entretanto, houve diferenciações entre as áreas de TPA estudados, com valores mais elevados nos perfis TPA2 e TPA3, concordando com os

resultados encontrados por Lehmann et al. (2003a) que verificaram somas de bases distintas em função dos ambientes de ocorrência.

A CTC a pH 7,0 nas áreas de terras pretas arqueológicas apresentou maiores valores quando comparados aos ambientes não antropogênicos. Para todos os perfis estudados há uma nítida tendência de decréscimo de CTC com a profundidade do solo, comportamento resultante do decréscimo da matéria orgânica com a profundidade. A elevada reatividade da matéria orgânica, pelo menos parcialmente, se origina do carbono pirogênico nos ambientes de TPA (GLASER *et al.* 2000).

A percentagem de saturação de bases (V%) apresentou valores mais elevados nos horizontes antrópicos dos sítios estudados, quando comparado aos solos não antropogênicos, vale ressaltar que nos perfis das terras pretas arqueológicas os valores do V% foram também elevados nos horizontes subsuperficiais, comportamento que não foi observado nos solos não antropogênicos.

## 4 I CONCLUSÕES

Os solos não antropogênicos apresentam maiores densidade do solo que as terras pretas arqueológicas;

As terras pretas arqueológicas apresentam atributos químicos e físico-químicos superiores aos solos não antropogênicos, conferindo-lhes maior fertilidade.

## REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Projeto Radambrasil, folha SB. 20, Purus.** Rio de Janeiro, 1978. 561 p.

CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; SANTOS, L. A. C.; AQUINO, R. E.; SOARES, M. D. R. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e umidade em áreas cultivadas com mandioca na região de Humaitá, AM. **Revista Agro@mbiente**, v.6, p. 09-16, 2012.

CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; RIBEIRO FILHO, M. R.; SOUZA, R. V. C. C.; ALMEIDA, M. C. Caracterização e Classificação de Terras Pretas Arqueológicas na região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, v. 70, p. 18-27, 2011.

COSTA, M. L.; KERN, D. C.; PINTO, A. H. E.; SOUZA, J. R. T. The ceramic artifacts in archaeological black earth (terra preta) from Lower Amazon Region, Brazil: chemistry and geochemical evolution. **Acta Amazonica**. v. 34, p. 375-386, 2004.

CPRM - Centro de Pesquisa de Recursos Minerais. **Hidroclimatologia, geologia, recursos minerais, geomorfologia e unidades de paisagens.** 2001. 93p. (Relatório Técnico).

CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; CANELAS, L. P.; NOVOTNY, E. H.; MOUTTA, R. O.; TROMPOWSKY, P.; SANTOS, G. A. Fracionamento químico da matéria orgânica e características de ácidos húmicos de solos com horizonte A antrópico da Amazônia (Terra Preta). **Acta Amazônica**, v.37, p.91-98, 2007.

CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; CANELLAS, L. P.; RIBEIRO, L. P.; BENITES, V.M.; SANTOS, G. A.; Soil organic matter and fertility of anthropogenic dark earths (terra preta de índio) in the Brazilian Amazon basin. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.85-93. 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 1997. 212p.

FALCÃO, N. P. S.; BORGES, L. F. Efeito da fertilidade de terra preta de índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão hawaí (Caricapapaya L.). **Acta Amazônica**. v.36, p.401-406, 2006.

FARIA, G. E.; BARROS, N. F.; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; PAIVA, A. O. Carbono orgânico total e frações da matéria orgânica em diferentes distâncias da cepa de eucalipto. **Cerne**, v.14, p.259-266, 2008.

FRASER, J. A.; CLEMENTE, C. R. Dark Earths and manioc cultivation in Central Amazonia: a window on pre-Columbian agricultural systems? **Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi de Ciências Humanas**, v.3, p.175-194, 2008.

GERMAN, L. A. Historical contingencies in the coevolution of environment and livelihood: contributions to the debate on Amazonian Black Earth. **Geoderma**. v. 111, p.307–331, 2003.

GLASER, B. Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. **Philosophical Transactions the Royal Society B.** v.362, p.187–196, 2007.

GLASER, B.; BALASHOV, E.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. 2000. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region.**Organic Geochemistry**, v.31 p.669-678, 2000.

LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GERMAN, L. A.; McCANN, J.; MARTINS, G. C.; MOREIRA, A. Soil fertility and production potential. In: LEHMANN, J., KERN, D. C., GLASER, B.; WOODS, W. I. (Ed.). **Amazonian dark earths; origin, properties and management**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003a. p.105-124.

LEHMANN, J.; SILVA, J. P.; STEINER, C.; NEHLS, T.; ZECH, W.; GLASER, B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant and Soil**. v.249, p.343-357, 2003b.

LIMA, H. N.; MELLO, J. W. V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; KER, J. C.; LIMA, A. M. N. Mineralogia e química de três solos de uma toposseqüência da Bacia Sedimentar do Alto Solimões, Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.59-68, 2006.

LIMA, H. N.; SCHAEFER, C. E. R.; MELLO, J. W. V.; GILKES, R. J.; KER, J.C. Pedogenesis and pre-Columbian land use of "Terra Preta Anthrosols" ("Indian black earth") of Western Amazonia. **Geoderma**, v.110, p.1-17, 2002.

MOREIRA, A. Fertilidade, matéria orgânica e substâncias húmicas em solos antropogênicos da Amazônia Ocidental. **Bragantia**, v.66, p.307-315, 2007.

NEVES JUNIOR, A. F. **Qualidade física de solos com horizonte antrópico (Terra Preta de Índio) na Amazônia Central**. 2008, 94f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Pulo. Piracicaba.

OGUNTUNDE, P. G.; FOSU, M.; AJAYI, A. E.; GIESEN, N. van. Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and textura of soil. **Biology and Fertility of Soils**, v. 39, p. 295-299, 2004.

REIS, M. S.; FERNANDES, A. R.; GRIMALDI, C.; DESJARDINS, T.; GRIMALDI, M. Características químicas dos solos de uma topossequência sob pastagem em uma frente pioneira da Amazônia Oriental. **Revista de Ciências Agrárias,** n. 52, p. 37-47. 2009.

RIBEIRO, G. A. A. **Produção e teor de nutrientes da liteira fina de capoeiras em Terra Preta de Índio e solos adjacentes**. 2006. 98f. Dissertação (Mestrado em Agricultura no Trópico Úmido) – Instituto Nacional de Pesquisas Amazônicas. Manaus.

RUIVO, M. L. P.; AMARAL, I. G.; FARO, M. P. S.; RIBEIRO, E. L. C. GUEDES, A. L. S.; SANTOS, M. M. L. S. Caracterização química da manta orgânica e da matéria orgânica leve em diferentes tipos de solo em uma toposseqüência na ilha de Algodoal/Maiandeua, PA. **Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi Ciências Naturais**, v. 1, p. 227-234, 2005.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. **Manual de descrição e coleta de solos no campo.** 5.ed. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100p.

SANTOS, L.A.C. **Caracterização de Terras Pretas Arqueológicas na região Sul do Amazonas**. Humaitá, 2011. 48p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal do Amazonas.

STEINBEISS, S.; GLEIXNER, G.; ANTONIETTI, M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. **Soil Biology and Biochemistry**, v.41, p.1301-1310, 2009.

TERAMOTO, E. R.; LEPSCH, I. F.; VIDAL-TORRADO, P. Relações solo, superfície geomórfica e substrato geológico na microbacia do ribeirão Marins (Piracicaba - SP). **Scientia Agrícola**. v.58, p.361-371, 2001.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil.**Communication in Soil Science and Plant Analysis**.v.19, p.1467-1476, 1988.

ZEE - ZONEAMENTO ECOLÓGICO ECONÔMICO DO SUL-SUDESTE DO AMAZONAS, AM. **Zoneamento Ecológico Econômico do Sul-Sudeste do Amazonas**. IPAAM, 53p. 2008.

# CAPÍTULO 3

# VARIAÇÃO ESPACIAL DA ESTABILIDADE DOS AGREGADOS E ESTOQUE DE CARBONO EM ÁREA DE TERRA PRETA ARQUEOLOGICA SOB CULTIVO DE CACAU

*Data de aceite: 18/05/2021*
*Data de submissão: 11/05/2021*

**Douglas Marcelo Pinheiro da Silva**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://lattes.cnpq.br/6219916883682579

**Milton César Costa Campos**
Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal da Paraíba
Areia - Paraíba
https://orcid.org/0000-0002-8183-7069

**Leandro Coutinho Alho**
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas
Lábrea - Amazonas
http://lattes.cnpq.br/4670525420962987

**José Maurício da Cunha**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://lattes.cnpq.br/3425545536495518

**Bruno Campos Mantovanelli**
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/2388955631974062

**RESUMO**: As Terras Pretas Arqueológicas ocorrem em antigos assentamentos indígenas, e tem como características marcante presença de artefatos cerâmicos e coloração escura com grande depósito estável de carbono orgânico, podendo apresentar em média até seis vezes mais carbono que solos não antropogênicos, figurando, portanto, como um grande reservatório de carbono orgânico. Assim o objetivo deste trabalho foi avaliar a variação espacial da estabilidade dos agregados e estoque de carbono em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM. Foi delimitada uma malha em uma área com Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau, com dimensões de 42 × 88 m, com espaçamentos de 6 × 8 m, totalizando 88 pontos amostrais, nestes locais coletaram-se amostras nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. Foram realizadas análises da densidade do solo, diâmetro médio geométrico e diâmetro médio Ponderado, carbono orgânico total e estoque de carbono. Os resultados foram submetidos às análises estatística descritiva e geoestatística. Os atributos do solo estudados apresentaram dependência espacial, com modelos esféricos e exponencial e alcance a partir de 20 m. A densidade do solo, diâmetro médio geométrico e diâmetro médio ponderado apresentaram-se dependentes da quantidade de carbono orgânico e estoque de carbono. Os elevados teores de carbono se correlacionaram com a densidade do solo e índices de agregação dos solos de Terra preta arqueológica.

**PALAVRAS-CHAVE**: Terra preta do índio, solos da Amazônia, solos antrópicos.

## SPATIAL VARIATION OF AGGREGATES STABILITY AND CARBON STOCK IN ARCHAEOLOGICAL DARK EARTH UNDER COCOA CULTIVATION

**ABSTRACT**: The Archaeological dark earth occur in ancient indian settlements and its striking characteristics are presence of ceramic artifacts and dark color with large stable deposit of organic carbon. It has average six times more carbon than not anthropogenic soils, appearing therefore as a large reservoir of organic carbon. So the aim of this study was to evaluate the spatial variation of aggregate stability and carbon stock in an area of Archaeological dark earth under cocoa cultivation at the municipality of Apuí, AM. A mesh was defined in an area with Archaeological dark earth under cocoa cultivation, with dimensions of 42 × 88 m, with spacing of 6 × 8 m, totaling 88 sample points collected at these sites were sampled at depths of 0.00-0.05; 0.05-0.10; 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m. Soil density bulk analyzes, geometric mean diameter and weighted average diameter, total organic carbon and carbon stock were measured. The results were subjected to descriptive and geostatistical statistical analysis. Soil attributes studied presented spatial dependence, spherical and exponential models and range from 20 m. Soil density, geometric mean diameter and mean weighted diameter presented themselves dependent on the amount of organic carbon and carbon stock in Archaeological dark earth soil. The high carbon content is correlated with soil bulk density and aggregation rates in Archaeological dark earth soils.
**KEYWORDS**: Indigenous dark earth, Amazonia soils, anthropogenic soils.

## 1 I INTRODUÇÃO

As Terras Pretas Arqueológicas (TPAs) ocorrem em antigos assentamentos indígenas, e tem como características marcante presença de artefatos cerâmicos e culturais, coloração escura com grande depósito estável de matéria orgânica (CAMPOS et al., 2011). Além disso, segundo Glaser (2001) as TPAs podem apresentar em média até seis vezes mais carbono orgânico estável que solos não antropogênicos, figurando, portanto, como um grande reservatório de carbono orgânico.

Por outro lado, as mudanças na cobertura vegetal e as transformações do ambiente alteram a dinâmica natural do carbono do solo que, segundo Campos et al. (2012), a medida em que os ecossistemas naturais vão sendo substituído por atividades voltadas para fins industriais ou produção de alimentos, há alterações ambientais, principalmente em função do uso e manejo inadequado dos solos (OLIVEIRA et al. 2015). Assim, alguns atributos são mais sensíveis às mudanças que outros, destacando-se, dentre esses, a estabilidade de agregados, densidade do solo, teor de carbono orgânico e estoque de carbono, que são indicadores utilizados para mensurar as alterações ocorridas no solo (ALHO et al. 2014).

Outro atributo físico do solo influenciado pela matéria orgânica é a agregação, que está relacionada com a disponibilidade de água e ar para as raízes e microbiota, e com a resistência mecânica do solo à penetração (VIEIRA et al. 2010). Além da agregação do solo, a matéria orgânica desempenha outras funções vitais ao ciclo da vida que vão desde a atividade de microorganismos do solo e da fauna, até a ação positiva sobre a

estabilidade dos agregados, porosidade e densidade do solo, contribuindo para diminuição da compactação do solo (SPERA et al. 2010).

Em ambientes de Terras Pretas Arqueológicas, devido ao seu grande estoque de carbono orgânico, acredita-se que parte desse material pode ser perdido para atmosfera e, dessa maneira, o conhecimento dos atributos do solo indicadores da qualidade especialmente em áreas de TPAs é fundamental, pois tanto influenciam na capacidade de produção das culturas como também desempenham funções ambientais importantes (AQUINO et al. 2014a). Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a variação espacial da estabilidade dos agregados e estoque de carbono em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau em Apuí, AM.

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

O estudo localizou-se no município de Apuí, Amazonas, Brasil, situado ao longo da rodovia Transamazônica (BR-230), sob as coordenadas geográficas de 7°12'05" S e 59°39'37" W. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região pertence ao grupo A (Clima Tropical Chuvoso) e tipo climático Am (chuvas do tipo monção), apresentando um período seco de pequena duração. A pluviosidade está limitada pelas isoietas de 2,250 e 2,750 mm, com período chuvoso iniciando em Outubro e prolongando-se até Junho. As temperaturas médias anuais variam entre 25 °C e 27 °C e a umidade relativa fica entre 85 e 90%.

A geologia da região apresenta arenitos da formação Beneficiente, recoberto por pacote argiloso do terciário. Em relação aos solos presentes no município, ocorre predominância das classes: Argissolos e Latossolos, sendo que o solo da área de estudo foi classificado como Argissolo Amarelo Eutrofico segundo Embrapa, (2013), e predomina a vegetação primaria formada por Floresta Tropical Densa, constituída por árvores adensadas (SDS, 2004).

A área de TPA vem sendo cultivado a quatorze anos Nos primeiros seis anos abrigou o cultivos de arroz, milho, feijão e melancia, e posteriormente foi inserido a cultura do cacau que permanece até o presente estudo. Neste local foi delimitado uma malha de 42 x 88 m, com espaçamentos de 6 x 8 m, totalizando 88 pontos amostrais, nestes locais coletou-se amostras nas profundidades 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

Nos pontos de cruzamento da malha foram coletados blocos de solo com estrutura preservada para determinação da estabilidade dos agregados do solo. Inicialmente o solo foi seco ao ar e passado em peneira de 9,52 e 4,76 mm. A determinação da estabilidade de agregados foi realizada pelo método de peneiramento úmido. Os agregados retidos na peneira de 4,76 mm foram colocados sobre um jogo de peneiras com malhas de 2,0; 1,0; 0,5; 0,25; 0,125 e 0,063 mm. As amostras foram submetidas a oscilações verticais durante 15 minutos, numa frequência de 32 oscilações por minuto. Foi adotado como índice de

estabilidade o diâmetro médio geométrico (DMG) e o diâmetro médio ponderado (DMP), cujo cálculo foi feito segundo Kemper & Rosenau (1986).

A densidade do solo (Ds) foi determinada em amostras com estrutura preservada, em cilindro volumétrico com 5,57 cm de diâmetro e 4,1 cm de altura, e secas em estufa a 105-110 °C, por 48 horas (EMBRAPA, 1997).

O carbono orgânico total foi determinado pelo método de Walkley-Black modificado por Yomans & Bremner (1988). O estoque de carbono (Est C) foi determinado pela expressão proposta por Veldkamp (1994):

$Est\ C = CO \times Ds \times e)/10$

sendo,

Est C = estoque de carbono orgânico (Mg $ha^{-1}$);

COT = teorde carbono orgânico total (g $kg^{-1}$);

Ds = densidadedo solo (kg $dm^{-3}$);

e = espessura da camada (cm).

Inicialmente os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, calculando-se a média, mediana, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, máximo, mínimo, coeficiente de assimetria, curtose e a hipótese de normalidade (Kolmogorov-Smirnov) pelo software estatístico Minitab 14 (MINITAB, 2000).

Na determinação da existência ou não da dependência espacial, utilizou-se a modelagem dos semivariogramas através do programa $GS^+$ (ROBERTSON, 1998). Tendo como base para a escolha do melhor ajuste do semivariograma respectivamente, os maiores valores do coeficiente determinação ($r^2$) e validação-cruzada. Após o ajuste dos modelos matemáticos permissíveis foi realizado à interpolação dos dados por meio da krigagem e em seguida a confecção dos mapas de isolinhas foram geradas no software Surfer versão 8.00.

## 3 I RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise estatística descritiva dos atributos estudados é apresentada na Tabela 1. Observa-se que todos os atributos estudados apresentaram valores de média e mediana próximos, e assimetria e curtose próximo de zero, com exceções do estoque de carbono (Est C) na profundidade de 0,00-0,05 e 0,10-0,20 m e carbono orgânico total (COT) na profundidade de 0,05-0,10 m que apresentou valores de curtose acima de 1, caracterizando assim uma distribuição simétrica dos dados. Segundo Alho et al (2014), a proximidade dos valores média e mediana assegura uma distribuição simétrica dos dados, permitindo a análise geoestatística. Outro aspecto citado pelo mesmo autor é que os valores de assimetria e curtose são sensíveis a valores extremos de forma que um único valor pode exercer grande influência nos seus resultados.

Em relação ao teste de normalidade (Tabela 1), todos os atributos apresentaram

distribuição normal, assemelhando-se aos resultados encontrados por Aquino et al. (2014a), que estudou solos antropogênicos e não antropogênicos no sul do Amazonas. Apesar de que mais importante que a normalidade dos dados é a ocorrência ou não do chamado efeito proporcional, que a média e a variabilidade dos dados sejam constantes na área de estudo, o que foi observado, ou seja, ocorrência de estacionalidade necessária ao uso da geoestatística (ISAAKS & SRIVASTAVA,1989).

Segundo a classificação do coeficiente de variação (CV) proposta por Warrick & Nielsen (1980), que classificaram como baixa variabilidade CV < 12%, média variabilidade CV entre 12 e 60% e alta variabilidade CV > 60%, observa-se que alguns atributos apresentaram baixa variabilidade, enquanto o DMG e EstC em todas as profundidades, DMP nas pronfundidades 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m e Ds na profundidade de 0,20-0,30 m que apresentaram média variabilidade. Estes resultados são considerados promissores já que estas variaveis normalmente tem alta variação nocampo conforme afirmam Aquino et al. (2014 b).

| Estatística Descritiva | Ds | DMG | DMP | COT | Est C |
|---|---|---|---|---|---|
| | Mg $m^{-3}$ | mm | | g $kg^{-1}$ | Mg $ha^{-1}$ |
| | | 0,00-0,05 m | | | |
| Média | 0,90 | 2,67 | 3,13 | 114,52 | 52,31 |
| Mediana | 0,89 | 2,67 | 3,14 | 114,39 | 51,33 |
| Máximo | 1,15 | 3,90 | 3,67 | 128,44 | 84,20 |
| Mínimo | 0,69 | 1,32 | 2,43 | 96,59 | 34,76 |
| [1]DP | 0,11ç | 0,50 | 0,20 | 8,12 | 8,42 |
| Variância | 0,01 | 0,25 | 0,04 | 65,90 | 70,90 |
| [2]CV% | 11,76 | 18,87 | 6,30 | 7,09 | 16,10 |
| Assimetria | 0,45 | -0,34 | -0,64 | -0,08 | 0,90 |
| Curtose | 0,16 | 0,91 | 1,54 | -0,88 | 1,93 |
| [3]d | 0,09* | 0,09* | 0,01 ns | 0,07* | 0,11* |
| | | 0,05-0,10 m | | | |
| Média | 0,95 | 2,55 | 3,01 | 105,45 | 54,35 |
| Mediana | 0,95 | 2,54 | 3,05 | 104,66 | 50,63 |
| Máximo | 1,18 | 3,92 | 3,50 | 122,65 | 82,21 |
| Mínimo | 0,73 | 1,25 | 2,43 | 97,40 | 38,52 |
| [1]DP | 0,09 | 0,45 | 0,21 | 4,69 | 11,25 |
| Variância | 0,01 | 0,20 | 0,04 | 21,97 | 126,49 |
| [2]CV% | 9,34 | 17,50 | 7,00 | 4,44 | 20,69 |
| Assimetria | 0,22 | 0,02 | -0,58 | 1,08 | 1,34 |
| Curtose | 0,44 | 0,61 | 0,27 | 1,85 | 0,81 |
| [3]d | 0,10* | 0,05* | 0,08* | 0,04* | 0,08* |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 0,10-020 m | | |
| Média | 0,95 | 2,53 | 2,52 | 107,43 | 59,01 |
| Mediana | 0,94 | 2,63 | 2,61 | 101,41 | 58,01 |
| Máximo | 1,25 | 3,52 | 3,98 | 118,27 | 71,65 |
| Mínimo | 0,73 | 1,28 | 1,26 | 90,15 | 34,46 |
| [1]DP | 0,10 | 0,43 | 0,50 | 6,44 | 6,03 |
| Variância | 0,01 | 0,19 | 0,25 | 41,42 | 36,44 |
| [2]CV% | 10,62 | 16,85 | 19,96 | 6,35 | 12,32 |
| Assimetria | 0,62 | -0,65 | -0,36 | 0,72 | 0,70 |
| Curtose | 0,32 | 0,06 | 0,34 | 0,43 | 1,54 |
| [3]d | 0,09*[s] | 0,02* | 0,05* | 0,07* | 0,05* |
| | | | 0,20-0,30 m | | |
| Média | 0,98 | 2,50 | 2,51 | 101,01 | 48,32 |
| Mediana | 0,97 | 2,57 | 2,62 | 101,48 | 44,49 |
| Máximo | 1,27 | 3,75 | 3,89 | 119,33 | 79,16 |
| Mínimo | 0,26 | 1,15 | 1,39 | 89,99 | 39,26 |
| [1]DP | 0,13 | 0,45 | 0,46 | 6,68 | 13,47 |
| Variância | 0,02 | 0,21 | 0,21 | 44,60 | 181,43 |
| [2]CV% | 13,46 | 18,15 | 18,22 | 6,24 | 23,10 |
| Assimetria | -1,48 | -0,25 | -0,20 | -0,36 | 1,17 |
| Curtose | 9,26 | 0,23 | -0,04 | 0,89 | 0,84 |
| [3]d | 0,09* | 0,09* | 0,08* | 0,10* | 0,08* |

[1]DP: desvio padrão; [2]CV: coeficiente de variação; [3]d: teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov, *significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 1. Estatística descritiva da densidade do solo (Ds), diâmetro médio geométrico (DMG), diâmetro médio ponderado (DMP), carbono orgânico total (COT) e estoque de carbono (Est C) em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

Os valores médios do DMP e DMG são maiores nas camadas superficiais e decrescem em profundidade coincidindo com o comportamento dos teores do COT e Est C (Tabela 1). Segundo Santos et al. (2013), em áreas de TPAs o carbono orgânico desempenha um papel determinante na formação e estabilização dos agregados, e a diminuição de seu conteúdo no solo alteram a estrutura do solo, já que a agregação, indiretamente, afeta outros atributos como porosidade, aeração, capacidade de retenção, infiltração de água, etc.

A densidade do solo apresenta-se valor abaixo de 1 Mg $m^{-3}$, indicando baixa densidade do solo (Tabela 1). Verifica-se ainda aumento desse valor coincidente com os baixos teores de COT, evidenciando assim o papel determinante do carbono orgânico no comportamento dessas variáveis conforme destacam Campos et al. (2011) que estudou perfis de TPA na região do médio Rio Madeira, embora tenha encontrado valores de COT nos horizontes antropogênicos, oscilando entre 43,7 e 80,3 g $kg^{-1}$, valores estes abaixo

dos encontrados neste trabalho. Santos et al. (2011), estudando atributos físicos em terra pretas arqueológicas na região sul do Amazonas, encontraram valores de densidade do solo (Ds) com medias semelhantes a este trabalho na superfície do solo e aumento em profundidade.

Os resultados das análises geoestatísticas para as Ds, DMG, DMP, COT e Est C, são apresentados na Tabela 2. Verificou-se dependência espacial para todos os atributos estudados. Os semivariogramas dos atributos do solo apresentaram dependência espacial e ajustaram-se aos modelos exponencial e esférico (Tabela 2), corroborando com outros estudos que apontam serem os modelos que melhor se ajustam aos atributos do solo (SOUZA et al., 2009; CAJAZEIRA & ASSIS JUNIOR, 2011).

Os valores da validação cruzada (VC) foram acima de 0,60, com exceção apenas do DMP eEst C na profundidade de 0,0-0,05 m que apresentaram respectivamente 0,58 e 0,54 (Tabela 2), segundo Wojciechowski et al. (2009) os valores da VC variam de 0 a 1, cuja os valores mais próximos de 1 apontam os mais eficiente modelos para representar o fenômeno estudado.

Quanto ao grau de dependência espacial (GDE), classificação segundo Cambardella et al. (1994), que avalia em termos proporcionais o efeito pepita sobre o patamar ($C_0$/($C_0$+$C_1$), mostraram-se, de modo geral, forte dependência espacial (GDE < 25%) para os atributos estudados. Todavia, exceção do DMP para a profundidade de 0,0-0,05 m e do Est C para a profundidade de 0,20-0,30 m, que mostraram moderada variabilidade. Resultados semelhantes foram encontrados por Oliveira et al. (2013) que estudou solos sob diferentes usos na Amazônia.

Os resultados do alcance da dependência espacial não apresentaram grandes variações. O DMG foi a variável que apresentou maior amplitude, com alcance de 26 a 43 m, o DMP variou de 31 a 39 m, já a Ds ficou entre 20 a 30 m e o Est C e COT entre 20 e 27 m (Tabela 2), semelhante aos resultados encontrados por Aquino et al. (2014a) que estudou solos antropogênicos e não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. A informação sobre o alcance podem auxiliar no subsidio de futuros estudos envolvendo amostragem de solos no que se refere a densidade amostral (AQUINO et al., 2014 b).

| Parâmetros | Ds | DMG | DMP | COT | Est C |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 0,00-0,05 m | | | |
| Modelo | Exp | Exp | Esf | Exp | Exp |
| Efeito Pepita | 0,00091 | 0,041 | 0,013 | 10,0 | 12,8 |
| Patamar | 0,0089 | 0,221 | 0,027 | 66,1 | 74,9 |
| Alcance (m) | 22 | 35 | 37 | 22 | 23 |
| [1]$R^2$ | 0,83 | 0,94 | 0,99 | 0,91 | 0,74 |
| [2]GDE (%) | 10 | 19 | 48 | 15 | 17 |
| [3]VC% | 0,81 | 0,70 | 0,58 | 0,64 | 0,54 |
| | | 0,05-0,10 m | | | |
| Modelo | Exp | Exp | Exp | Exp | Esf |
| Efeito Pepita | 0,00082 | 0,018 | 0,007 | 2,70 | 35 |
| Patamar | 0,00062 | 0,135 | 0,039 | 22,67 | 140 |
| Alcance (m) | 30 | 26 | 31 | 26 | 23 |
| [1]$R^2$ | 0,89 | 0,94 | 0,98 | 0,85 | 0,86 |
| [2]GDE (%) | 13 | 13 | 18 | 12 | 25 |
| [3]VC% | 80 | 0,80 | 0,78 | 0,70 | 0,89 |
| | | 0,10-0,20 m | | | |
| Modelo | Exp | Esf | Esf | Exp | Exp |
| Efeito Pepita | 0,00087 | 0,009 | 0,047 | 4,90 | 3,0 |
| Patamar | 0,00083 | 0,194 | 0,196 | 42,85 | 28,3 |
| Alcance (m) | 28 | 43 | 39 | 25 | 23 |
| [1]$R^2$ | 0,97 | 0,97 | 0,98 | 0,90 | 0,92 |
| [2]GDE (%) | 10 | 5 | 24 | 11 | 11 |
| [3]VC% | 0,75 | 0,99 | 89 | 0,75 | 0,82 |
| | | 0,20-0,30 m | | | |
| Modelo | Exp | Esf | Exp | Exp | Esf |
| Efeito Pepita | 0,0015 | 0,017 | 0,021 | 4,20 | 49,8 |
| Patamar | 0,0096 | 0,162 | 0,204 | 45,63 | 146,6 |
| Alcance (m) | 20 | 11 | 34 | 24 | 27 |
| [1]$R^2$ | 0,95 | 0,94 | 0,99 | 0,91 | 0,95 |
| [2]GDE (%) | 16 | 11 | 10 | 9 | 34 |
| [3]VC% | 0,71 | 0,76 | 0,80 | 0,85 | 0,96 |

Est C: estoque de carbono do solo; COT: carbono orgânico total; DMG: diâmetro médio geométrico; DMP: diâmetro médio ponderado; Ds: Densidade do solo; Esf.:Esférico; Exp.: Exponencial;Lin: Linear; [1]$R^2$: coeficiente de determinação; [2]GDE%: grau de dependência espacial e; [3]VC: validação cruzada.

Tabela 2. Modelos e parâmetros estimados aos semivariogramas da Ds, DMG, DMP, COT e Est C do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

Apesar da densidade do solo apresentar baixos valores, verificou-se que, a partir da profundidade 0,05 até 0,30 m, há formação de uma zona de maiores valores de Ds (Figura

1), segundo Campos et al. (2012) em estudos com TPAs e solos não antrópicos, este fato deve-se ao afastamento do horizonte antrópico e proximidade aos horizontes de maior influência do material parental.

Os mapas de krigagem dos índices da estabilidade de agregados (DMG e DMP) nas diferentes profundidades apresentam resultados semelhantes entre si (Figura 2). Verifica-se também que as manchas nos mapas de DMG e DMP são coincidentes com as dos teor COT e maior Est C (Figura 3), esse fato também foi observado por Souza et al., (2009) e Coutinho et al., (2010), para Vieira et al., (2011), resultados que mostram a importância do carbono na agregação do solo.

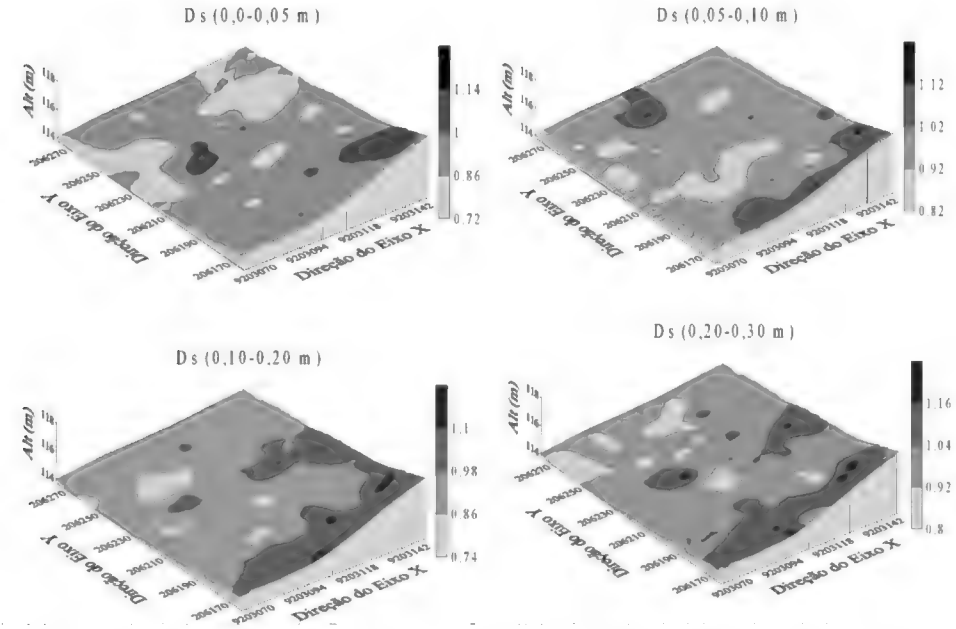



Figura 1. Mapas de krigagem da Ds nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,010; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 mem área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

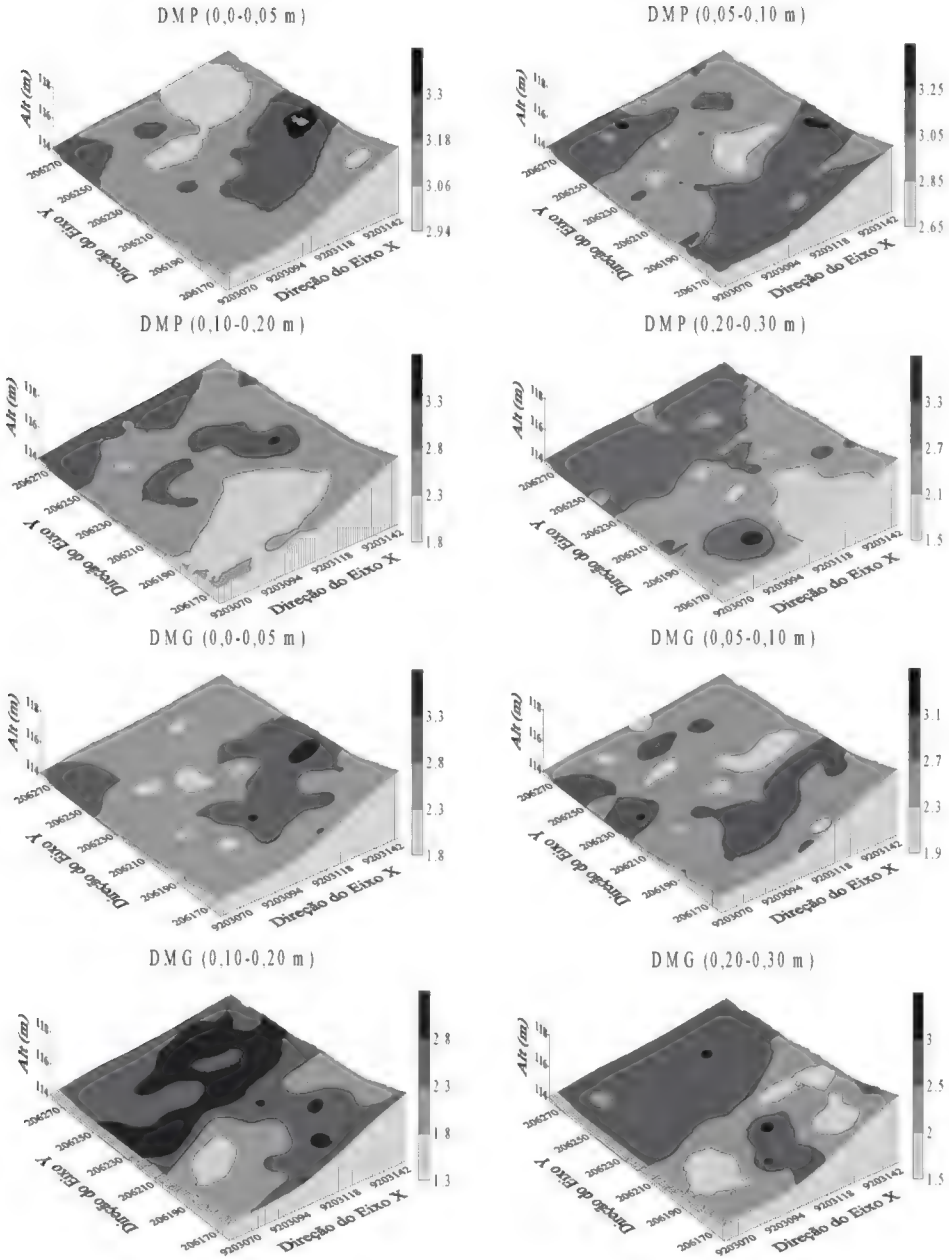



Figura 2. Mapas de krigagem do DMP e DMG nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,010; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

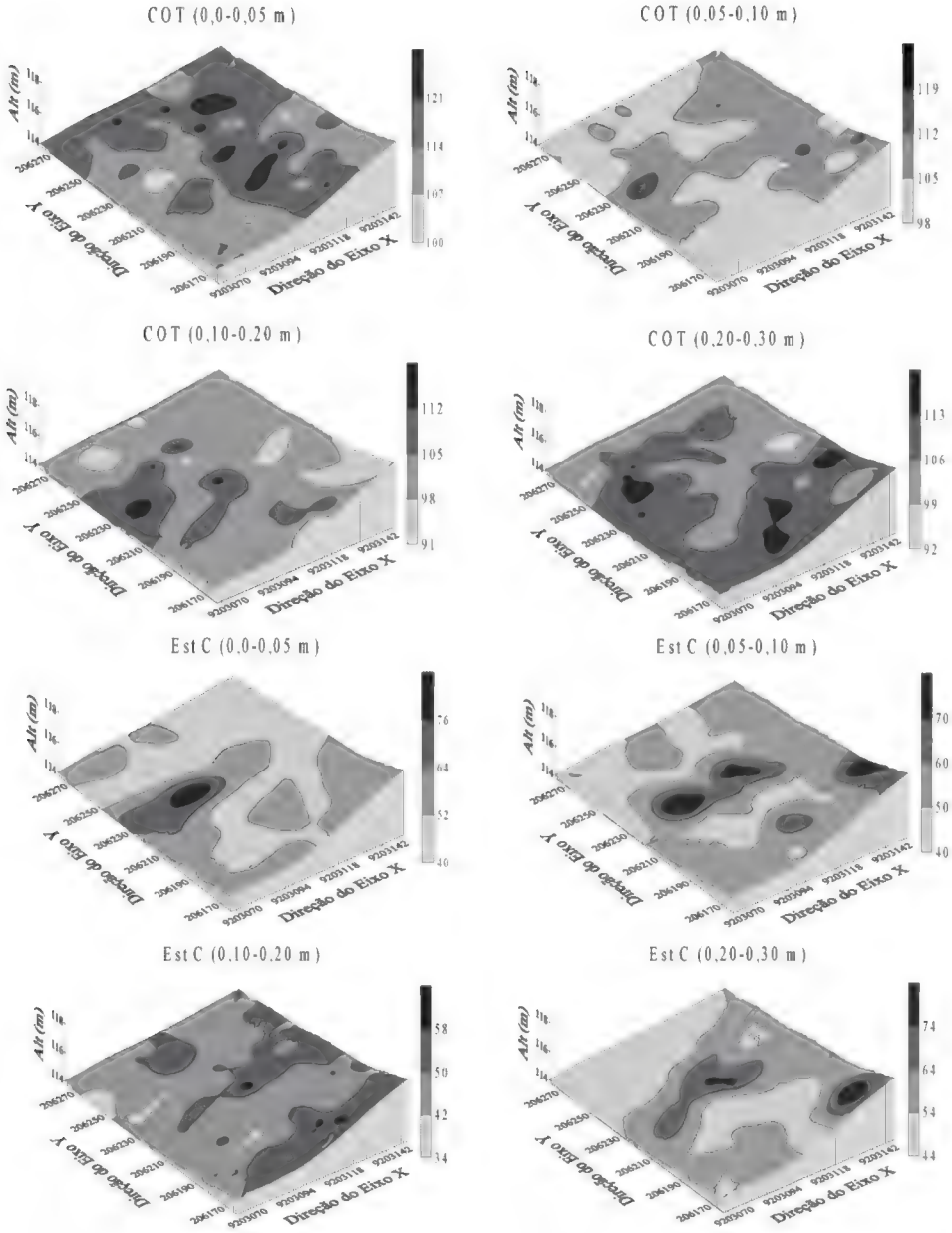



Figura 3. Mapas de krigagem doCOT e Est C nas profundidades de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 mem área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

## 4 I CONCLUSÕES

Os atributos do solo estudados apresentaram dependência espacial, com modelos esféricos e exponencial e alcance a partir de 20 m;

A densidade do solo, diâmetro médio geométrico e diâmetro médio ponderado apresentaram-se dependentes da quantidade de carbono orgânico e estoque de carbono.

## REFERÊNCIAS


ALHO, L.C. et al. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados eestoque de carbono em Cambissolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuaria Tropical.** Goiânia, v. 44, n. 3, p. 246-254. 2014.

AQUINO, R. E. et al. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em latossolo sob floresta nativa e pastagem na Região de Manicoré, Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 397-406,2014 b.

AQUINO, R. E. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos antropogênico e não antropogênico na região de Manicoré, AM. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, p. 988-997, 2014 a.

CAJAZEIRA, J.; ASSIS JUNIOR, R. N.Variabilidade espacial das frações primárias e agregados de um Argissolo no estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, p. 258-267, 2011.

CAMBARDELLA, C.A. et al. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. **Soil Science Society of America Journal,** Madison, v.47, p.1501-1511, 1994.

CAMPOS, M.C.C. et al. Caracterização e Classificação de Terras Pretas Arqueológicas na região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, Campinas, v. 70, p. 18-27, 2011.

CAMPOS, M.C.C. et al. Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. **Agro@mbiente On-line,** Boa Vista, v. 6, p. 102-109, 2012.

COUTINHO, F. S. et al. Estabilidade de agregados e distribuição do carbono em Latossolo sob sistema plantio direto em Uberaba, Minas Gerais. **Comunicata Scientiae,** Bom Jesus, v. 2, p. 100-105, 2010.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Brasília, 2013. 353p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAAGROPECUÁRIA (Embrapa). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**.2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1997.

GLASER, B.G. The Grounded Theory perspective: Conceptualizations contrasted with description, Sociology Press, Mill Valley, CA. 2001.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. A**n introduction to applied geoestatistics.** New York: Oxford University Press, p.561, 1989.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. **Aggregate stability and size distribution**. In: KLUTE, A. (Ed.) Methods of soil analysis. Part I. Physical and minerological methods. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1986. p. 425-442.

MINITAB Release 14.1, **Statistical Software**. 2000.

OLIVEIRA, I. A. et al. Caracterização de solos sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 45, p. 1-12, 2015.

OLIVEIRA, I. A. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, p.1103-1112, 2013.

ROBERTSON, G.P. **GS+ geostatistics for the environmental sciences**: GS+ user's guide. Plainwell: Gamma Design Software, 1998.152p.

SANTOS, L. A. C. et al. Caracterização física de seis sítios de Terras Pretas Arqueológicas na região de Apuí-AM. **Revista Verde**, Mossoró, v.6, p. 167-174, 2011.

SANTOS, L.A.C. et al. Caracterização de terras pretas arqueológicas no sul do estado do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 825-836, 2013.

SDS - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Relatório técnico síntese dos diagnósticos**: Área estadual sul de Apuí e Manicoré. Manaus, 2004. 20p.

SOUZA, Z.M. et al. Spatial variability of aggregate stability in Latosols under sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.245-253, 2009.

SPERA, S. T. et al. Atributos físicos de um Hapludox em função de sistemas de produção integração lavoura-pecuária (ILP), sob plantio direto. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 32, p. 37-44, 2010.

VIEIRA, S. R. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos relacionados com o estado de agregação de dois Latossolos cultivados no sistema de semeadura direta. **Bragantia**, Campinas, v. 70, p.185-195, 2011.

VIEIRA, S. R. et al. Variabilidade espacial e temporal do teor de água do solo sob duas formas de uso. **Bragantia**, Campinas, v.69, p.181-190, 2010.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. **Spatial variability of soil physical properties in the field.** In: HILLEL, D. Applications of soil physics. New York: Academic Press, 1980. cap. 2, p.319-344.

WELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, Madson, v.58, p.175-180, 1994.

WOJCIECHOWSKI, J.C. et al. Geoestatística aplicada ao estudo das características físico-químicas do solo em áreas de floresta estacional decidual. **Ciência Florestal,** Santa Maria, v.19, p. 383-391, 2009.

YEOMANS, J.C.; BREMMER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis,** Baltimore, v.19, p.1467-1476, 1988.

# CAPÍTULO 4

# EMISSÃO DE $CO_2$ DO SOLO EM ÁREAS DE TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA NA REGIÃO AMAZÔNICA

*Data de aceite: 18/05/2021*

**Emily Lira Simões**
Universidade Federal de Viçosa
Viçosa – Minas Gerais
http://lattes.cnpq.br/0014643511799549

**José Maurício da Cunha**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://lattes.cnpq.br/3425545536495518

**Milton César Costa Campos**
Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal da Paraíba
Areia - Paraíba
https://orcid.org/0000-0002-8183-7069

**Denilton Carlos Gaio**
Instituto de Física – Universidade Federal de Mato Grosso
Cuiabá – Mato Grosso
http://lattes.cnpq.br/8132654148436579

**Zigomar Menezes de Souza**
Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas
Campinas – São Paulo
https://orcid.org/0000-0001-9302-6725

**Marcelo Dayron Rodrigues Soares**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
https://orcid.org/0000-0003-2942-5320

**Douglas Marcelo Pinheiro da Silva**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://lattes.cnpq.br/6219916883682579

**RESUMO**: Em ecossistemas naturais, a respiração do solo é um componente fundamental da emissão de carbono para a atmosfera – fluxo. O fluxo do $CO_2$ apresenta tanto variabilidade temporal (devido à mudança de temperatura e umidade), como espacial, que pode ser justificada por diferentes tipos de solo, assim como o uso e manejo do solo. Assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar a variabilidade espacial da emissão de $CO_2$ do solo, temperatura do solo e umidade do solo em áreas de Terra Preta Arqueológica sob os cultivos feijão guandu e pastagem, em comparação ao uso do solo sob floresta nativa. Para isso, foram delimitadas malhas regulares sobre as áreas de floresta (com espaçamento 6 x 6 m), feijão guandu (com espaçamento 4 x 5 m) e pastagem (com espaçamento 8 x 8 m), com dimensões de 2.500 $m^2$, de 1.700 $m^2$ e de 4.800 $m^2$, respectivamente, com 88 pontos amostrais em cada área. Nos pontos de cruzamento das malhas, foram avaliadas a emissão de $CO_2$ ($FCO_2$) e temperatura do solo (TS), além da coleta de amostras de solo, na profundidade 0,00-0,05 m, para a determinação da umidade do solo (US) em laboratório. As avaliações do $FCO_2$ foram realizadas utilizando-se os sistemas LI-6400. Concomitantemente foram realizadas às medidas da temperatura do solo (TS) na camada de 0,00-0,10 m de profundidade, utilizando um termômetro de termistor portátil e a umidade do

solo (US), utilizando amostras de solo coletadas na camada de 0,00-0,10 m. O $FCO_2$ e a TS foram menores sob floresta, com maior teor de US, não apresentando diferença entre o $FCO_2$ e a TS sob o FJ e PT, mas com menor teor de US sob PT. Os modelos de ajuste do semivariograma experimental foram predominantemente o esférico, com exceção do $FCO_2$ para as áreas da FN e FJ, e da US sob a área de PT, que teve ajuste ao modelo exponencial. Os mapas dos padrões de distribuição espacial indicam uma tendência de concentração, com correlações positiva entre $FCO_2$ com a US e negativa com a TS sob a floresta natural. Correlações positivas entre $FCO_2$ com a TS com a US sob o FJ, mas apenas correlações entre $FCO_2$ e US sob a PT.
**PALAVRAS-CHAVE**: Variabilidade espacial, temperatura do solo, umidade do solo, atributos físicos, carbono orgânico.

## SOIL $CO_2$ EFFLUX IN ARCHAEOLOGICAL DARK EARTH AREAS IN THE AMAZON REGION

**ABSTRACT**: In natural ecosystems, soil respiration is a key component of carbon emission into the atmosphere – $CO_2$ efflux. Soil $CO_2$ efflux has both temporal variability (due to temperature and moisture changes) and spatial variability, which can be explained by different types of soil, as well as soil use and management, as well as the influence of vegetation of $CO_2$ efflux. The objective of this study was to measure the spatial variability of soil $CO_2$ efflux, soil temperature and soil moisture in areas of Archaeological Dark Earth cultivated with the guandu bean (GB) and pasture (PT), compared to soil use in native forest (NF) in Amazonas, Brazil. To this end, regular meshes were marked out in areas of forest (6 x 6 m spacing), guandu bean (4 x 5 m spacing) and pasture (8 x 8 m spacing) measuring 2,500 $m^2$, 1,700 $m^2$ and 4,800 $m^2$, respectively, with 88 sample points in each area and georeferenced. Soil $CO_2$ efflux ($FCO_2$) and soil temperature (ST) were measured at the points of intersection of the meshes, and soil samples were collected at the depth of 0.00-0.10 m to determine soil moisture (SM) in the laboratory. $FCO_2$ measurements were taken using LI-6400 systems. At the same time, measurements were taken of soil temperature (ST) at the depth of 0.00-0.10 m, using a portable thermistor thermometer, and of soil moisture (SM), using soil samples collected at the depth of 0.00-0.10 m. $FCO_2$ and ST were lower in the forest area, with higher SM content, with no difference between $FCO_2$ and ST in GB and PT, but with lower SM content in PT. The models of the experimental semivariograma were predominantly spherical, except for $FCO_2$ in the NF and GB areas, and SM in the PT area, which were adjusted to the exponential model. The maps of patterns of spatial distribution indicate a trend of concentration, with positive correlation of $FCO_2$ with SM and negative correlation of $FCO_2$ with ST in natural forest. Positive correlations were observed of $FCO_2$ with ST and SM in GB, but in PT, $FCO_2$ correlations were restricted to SM.
**KEYWORDS**: Spatial variability, soil temperature, soil moisture, physical properties, organic carbon.

## 1 I INTRODUÇÃO

Em ecossistemas naturais a respiração do solo é um componente fundamental da emissão de gás de efeito estufa para a atmosfera - efluxo. Diversas pesquisas na

área constataram que mudanças de temperatura e umidade do solo podem influenciar a variabilidade temporal da emissão de $CO_2$ (Zhou et al., 2006; Almagro et al., 2009; Silva et al., 2016).

Os padrões de variabilidades espaciais da emissão de $CO_2$ dentro de uma mesma malha são de difícil explicação, porque a variabilidadede em pequena escala requer um grande número de medições espacialmente distribuído (Herbst et al., 2008; Rodeghiero and Cescatti, 2008). Para a temperatura do solo, a variabilidade tanto espacial quanto temporal é mínima, cuja justificativa é dado ao grande volume de vegetação ou até mesmo pelo aumento da produção de biomassa na superfície, proporcionada por práticas agrícolas (Silva et al., 2015).

A variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo tem sido objeto de estudo em diversos trabalhos (Oliveira et al., 2015a, b; Aquino et al., 2015). Entretanto, estudos da emissão de $CO_2$ do solo tem-se mostrado com um padrão de variabilidade espacial, tendo como seu principal fator determinante a umidade do solo (Tang et al., 2006; Zhou et al., 2006; Mariko et al., 2007; Kosugi et al., 2007; Almagro et al., 2009; Panosso et al., 2009).

A taxa de transferência de carbono é controlada por diversos fatores, como, a emissão de $CO_2$ do solo pela temperatura, pressão e umidade do solo; pelos atributos físicos do solo; pela quantidade de serrapilheira sobre o solo e teor de matéria orgânica no solo (Schwendenmann et al., 2003). O $CO_2$ na superfície do solo é produzido principalmente pelo sistema radicular das plantas e por processos de decomposição aeróbicos da matéria orgânica pelos microorganismos.

Terras Pretas Arqueológicas são solos de coloração escura que apresenta elevada fertilidade natural, devido à grande concentração de material orgânico e elevados teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e fósforo (P) (Lima et al., 2009), cuja característica marcante é a presença de artefatos cerâmicos e/ou líticos indígenas incorporados à matriz dos horizontes superficiais do solo (Kämpf and Kern, 2005). Desses ambientes, não existem estudos relacionados à variabilidade espacial da emissão de $CO_2$, temperatura e umidade do solo. Há, assim, necessidade na avaliação dos padrões de variabilidade espacial desses atributos em áreas sob floresta e agricultáveis.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade espacial da emissão de $CO_2$, temperatura e umidade do solo em ambientes de Terra Preta Arqueológica sob os cultivos de feijão guandu e de pastagem, em comparação ao de ambiente sob floresta nativa.

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

O estudo localizou-se no município de Novo Aripuanã, Amazonas, Brasil, situado ao longo da rodovia Transamazônica (BR-230) (Figura 1). O clima da região é Tropical

Chuvoso, apresentando um período seco de pequena duração. A pluviosidade média varia entre 2.250 e 2.750 mm, com período chuvoso entre outubro a junho. As temperaturas médias anuais variam entre 25°C e 27°C e a umidade relativa fica entre 85 e 90%.

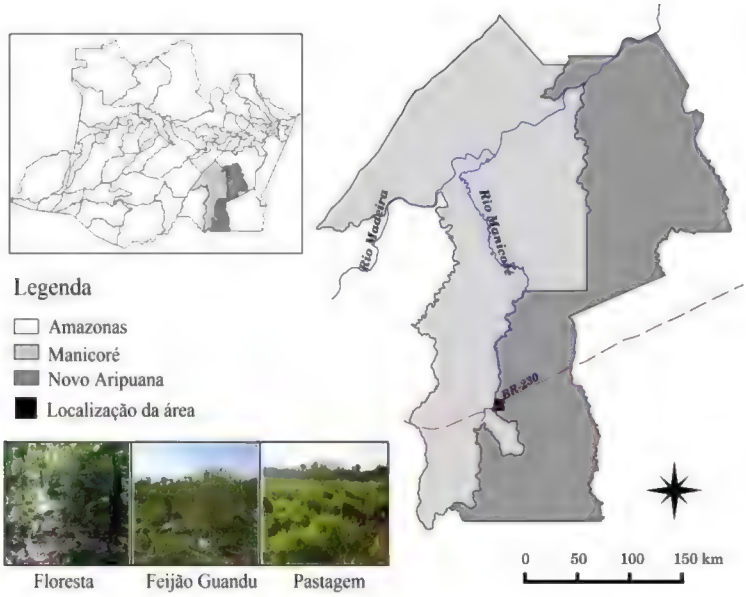



Figura 1. Localização das áreas de estudo no município de Novo Aripuanã (Figura 1), Amazonas, Brasil, situado ao longo da rodovia Transamazônica (BR-230).

A área de TPA sob floresta natural (FN) vem sendo preservada a mais de vinte e cinco anos, com início de recuperação florestal natural com árvores de porte mediano, chegando a apresentar até quinze metros de altura. Os usos com TPA sob cultivo de feijão guandu (*Cajanus cajan*) (FJ) e pastagem *Brachiaria brizanta* (PT) abrigou nos últimos vinte e cinco anos os cultivos milho, feijão e melancia. Nos últimos oito meses, foi inserido o pasto para atividades de pecuária, preservando a área do feijão guandu. Dados de precipitação média diárias foram registrados conforme a Tabela 1, obtidos em estações meteorológicas disponibilizados pelo INMET em regiões entorno do local de estudo.

| Data | Temperatura do ar (°C) | Umidade do ar (%) | Precipitação (mm) |
|---|---|---|---|
| 05/11/2015 | 26,00 | 83,33 | 0,13 |
| 06/11/2015 | 24,61 | 87,96 | 1,55 |
| 07/11/2015 | 25,83 | 80,89 | 0,00 |
| 08/11/2015 | 27,36 | 76,53 | 0,12 |

Tabela 1. Média de dados climáticos de estações automáticas entre as regiões de Apuí, Humaitá e Manicoré, no estado do Amazonas.

Fonte: INMET

Foi delimitado uma malha amostral de aproximadamente 2.500 $m^2$ para FN, 1.700 $m^2$para FJ e 4.800 $m^2$ para PT, com espaçamentos de 6 × 6 m, de 4 × 5 m e de 8 × 8 m, respectivamente, totalizando 88 pontos amostrais por malha. Nos pontos de cruzamento das malhas foi avaliada a emissão de $CO_2$, temperatura do solo e umidade do solo. Esses pontos foram georreferenciados com um equipamento de GPS, realizando assim o mapeamento das áreas. As avaliações da emissão de $CO_2$, temperatura e umidade do solo foram realizadas nos dias 06, 07 e 08 de novembro de 2015, entre os horários de 09 a 11 horas de cada dia, para as áreas de feijão guandu, floresta e pastagem, respectivamente.

Foram coletados blocos de solos com estrutura preservada e anéis volumétricos na camada 0,00-0,10 m, para a determinação dos atributos físicos e do carbono orgânico. A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, utilizando uma solução normal de NaOH como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de alta rotação por 15 minutos, seguindo metodologia proposta pela Embrapa (2011). A densidade do solo (Ds), macroporosidade (MaP) e microporosidade (MiP), volume total de poros (VTP) e umidade gravimétrica (Ug) foram mensuradas segundo a metodologia da Embrapa (2011), utilizando amostras de solos em anéis volumétricos.

O carbono orgânico (CO) foi determinado pelo método proposto por Yeomans e Bremner (1988). A matéria orgânica é determinado pelo produto do CO com 1,724 (Embrapa, 2011).O estoque de carbono (EC) foi definido pela equação 1:

$$EC = Ds \times h \times CO, \quad (1)$$

onde: EC = estoque de carbono (Mg $ha^{-1}$); Ds = densidade do solo (Mg $m^{-3}$); h = espessura da camada de solo amostrada (cm); CO = teor de C (%).

As avaliações da emissão de $CO_2$ do solo ($FCO_2$) foram realizadas utilizando-se os sistemas LI-6400. O $CO_2$ emitido pelo solo é captado pela câmara de gás acoplada a um sistema de análise portátil LI-6400, que por sua vez calcula o fluxo de $CO_2$ do solo no interior da câmara por meio de espectroscopia de absorção óptica, na faixa do infravermelho. Concomitantemente às leituras de $FCO_2$, foram realizadas medidas da temperatura do solo (TS) na camada de 0,00-0,10 m de profundidade, utilizando-se um termômetro de termistor portátil. Para a determinação da umidade do solo (US), foram coletadas amostras de solo em latas de alumínio, na camada de 0,00-0,10 m para cada ponto amostral. Das amostras de solos, foram medidas as massas de solo úmidas e secas em estufa a 105°C, para assim determinar a US, segundo a metodologia da Embrapa (2011).

Após a determinação dos atributos, foram realizadas análises estatísticas univariada e geoestatistica. A análise de variância univariada (ANOVA) foi utilizada para comparar médias dos atributos individualmente utilizando o teste de Tukey, tendo como referência a área de TPA sob floresta natural (FN), a um nível de significância de 5% de probabilidade. Para a análise estatística, foi utilizada o programa computacional Statistica 7.0.

A análise geoestatística foi realizada com base no semivariograma experimental, estimado pela equação abaixo:

$$\hat{y}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

sendo $\hat{y}(h)$ o valor da semivariância para uma distância $h$; $n(h)$ o número de pares envolvidos no cálculo da semivariância; $Z(x_i)$ o valor do atributo $Z$ na posição $x_i$; e $Z(x_i + h)$ o valor do atributo $Z$ separado por uma distância $h$ da posição $x_i$.

Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de ŷ(h), são estimados os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma (o efeito pepita, $C_0$; patamar, $C_0$+$C_1$; e o alcance, a). Os modelos de semivariogramas considerados foram o esférico, o exponencial, o linear e o gaussiano. Para a análise do grau de dependência espacial (GDE) dos atributos em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994).

Os modelos do semivariograma do $FCO_2$, TS e US foram estimados pelo programa computacional GS+ e construídos os mapas dos padrões espaciais por krigagem ordinária. Correlação de Pearson foi utilizada para avaliar a força e direção da correlação mapas do padrão de distribuição das variáveis estudadas. Foi retirada da tendência em termos das coordenadas espaciais para os semivariogramas experimentais que não se estabilizaram, utilizando a função *nls* no programa computacional R.

## 3 I RESULTADOS E DISCUSSÃO

A densidade do solo (Ds) não apresentou diferença ($p<0,05$) em relação aos usos do solo (Tabela 2). Entretanto, os solos apresentaram maior macroporos (MaP) em floresta natural (FN) e, consequentemente, menor microporos (MiP), em comparação aos usos de feijão guandu (FJ) e pastagem (PT). Também corroboram com esses resultados os menores teores de areia sob FN, seguido de maiores teores de silte e argila. Tanto a matéria orgânica (MO) e o estoque de carbono (EC) foram maiores na área sob FJ. A elevada cobertura vegetal sobre o solo de FJ, com mais de oito meses de plantio sem sofrer práticas intensivas no solo e trânsitos de animais podem ter favorecido a elevadas taxas de MO no solo.

| Estatística | Ds | MaP | MiP | MO | EC | Areia | Silte | Argila |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | mg $m^{-3}$ | $m^3$ $m^{-3}$ | | g $kg^{-3}$ | t $ha^{-1}$ | g $kg^{-1}$ | | |
| | | | | **Floresta natural** | | | | |
| Média | 1,32 a | 24,65 a | 29,51 b | 39,01 b | 147,97 b | 701,34 c | 195,89 a | 102,77 a |
| DP | 0,08 | 2,66 | 2,37 | 8,46 | 28,14 | 39,64 | 36,31 | 14,71 |
| CV | 6,06 | 10,79 | 8,03 | 21,69 | 19,02 | 5,65 | 18,54 | 14,31 |
| | | | | **Feijão guandu** | | | | |
| Média | 1,35 a | 22,93 b | 31,18 a | 43,99 a | 166,99 a | 768,73 a | 145,22 c | 86,07 b |
| DP | 0,1 | 3,84 | 3,32 | 10,29 | 34,84 | 39,39 | 40,39 | 25,2 |
| CV | 7,41 | 16,75 | 10,65 | 23,39 | 20,86 | 5,12 | 27,81 | 29,28 |
| | | | | **Pastagem** | | | | |
| Média | 1,32 a | 21,51 c | 32,14 a | 38,8 b | 148,54 b | 745,19 b | 173,70 b | 81,11 b |
| DP | 0,08 | 4,9 | 3,25 | 7,67 | 29,1 | 27,42 | 31,5 | 17,05 |
| CV | 6,06 | 22,78 | 10,11 | 19,77 | 19,59 | 3,68 | 18,13 | 21,02 |

Ds = densidade do solo; MaP =macroporosidade; MiP =microporosidade; MO = matéria orgânica; EC = estoque de carbono; CV = coeficiente de variação (%); DP = desvio padrão. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 2. Características físicas e carbono orgânico nas áreas de Terra Preta Arqueológicas na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

A FN apresentou menores valores de fluxo de $CO_2$ ($FCO_2$) e temperatura do solo (TS) e o maior valor de umidade do solo (US) (Tabela 3). Provavelmente, a incidência de chuvas no dia anterior à coleta do $FCO_2$ (Tabela 1) proporcionou o acúmulo de água no solo, que por sua vez está relacionada com a substituição imediata dos poros cheios de ar pela água, que podem formar um tampão e impede a difusão de gás de $CO_2$ do solo para a atmosfera. Por outro lado, os resultados podem ser justificados por menores teores de MO e EC na área de FN em comparação a área de FJ, não apresentando diferença em relação a PT (Tabela 2). Os valores da Ds não apresentaram diferença ($p>0,05$) nas áreas estudadas, ocorrendo maior porcentagem de MaP sob a FN, corroborando com porcentagens mais elevadas de MiP no FJ e PT.

Pesquisas têm revelado que a emissão de $CO_2$ é em grande parte controlada pela temperatura do solo, mas pode ser também controlado pela umidade do solo, dependendo dos limites do conteúdo de água no solo (Tang et al., 2006; Zhou et al., 2006; Almagro et al., 2009). Por outro lado, tem-se constatado que o molhamento do solo aumenta a emissão de $CO_2$ pelo solo, desde que o teor volumétrico de água no solo seja inferior a 10% (Mariko et al., 2007).

| Áreas | Média | Desvio Padrão | Assimetria | Curtose | CV% |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | **Emissão de $CO_2$ (µmol $m^{-2}s^{-1}$)** | | |
| Floresta | 1,91 b | 0,56 | 0,84 | 0,55 | 29,3 |
| Feijão guandu | 2,29 a | 0,54 | 0,67 | 0,42 | 23,6 |
| Pastagem | 2,26 a | 0,71 | 0,78 | 0,83 | 31,4 |
| | | | **Temperatura do solo (°C)** | | |
| Floresta | 25,87 b | 0,41 | 1,02 | 0,82 | 1,6 |
| Feijão guandu | 28,09 a | 0,62 | 0,34 | -0,34 | 2,2 |
| Pastagem | 28,26 a | 0,84 | 0,61 | 0,01 | 3,0 |
| | | | **Umidade do solo (% volume)** | | |
| Floresta | 20,07 a | 3,50 | 0,23 | -0,29 | 17,4 |
| Feijão guandu | 18,48 b | 3,03 | 0,33 | -0,54 | 16,4 |
| Pastagem | 16,94 c | 2,87 | -0,44 | -0,39 | 16,9 |

CV = coeficiente de variação (%).Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 3. Estatística descritiva da emissão de $CO_2$, temperatura do solo e umidade do solo nas áreas de Terra Preta Arqueológicas na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

Não houve diferença ($p<0,05$) para o $FCO_2$ e TS em relação às áreas de FJ e PT, porém, a US apresentou menor valor sob PT (Tabela 3). A umidade do solo sob FJ se justifica pela incidência de chuva duas horas anterior à coleta, mas o teor de água no solo não afetou a temperatura do solo (Tabela 1).

Panosso et al. (2009) verificaram pouca variação da emissão de $CO_2$ e da temperatura do solo em poucas horas após uma chuva, para solos com uma umidade acima de 14%. Resultados obtidos por Pinto-Junior et al. (2009) demonstram valores mais elevados da emissão de $CO_2$ para o mês de novembro, com temperatura do solo semelhante, mas com umidade do solo abaixo de 10%, para área de floresta de transição Amazônica e o cerrado e de pastagem com braquiária.

Conforme as caracteristicas texturais das áreas em estudo (Tabela 2), os teores de silte e argila foram maiores na área de FN, corroborando com menor concentração de areia, sendo que o teor de argila não diferiu ($p>0,05$) entre as áreas de FJ e PT, mas com maior concentração do teor de areia e menor de silte na área sob FJ. Entretanto, não foram constatadas correlações significativas do $FCO_2$ com a TS e a US para as áreas em estudo (Tabela 4), mas que o $FCO_2$ apresentou correlações com os teores de areia e argila para as áreas de FJ e PT. Tanto a TS quanto a US para as áreas em estudo mostraram-se correlacionadas com os teores de areia e silte.

| | Areia | Silte | Argila | Temperatura | Fluxo de $CO_2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| **Floresta Natural** | | | | | |
| Silte | -0,94* | | | | |
| Argila | -0,28* | -0,06 | | | |
| Temperatura | 0,41* | -0,45* | 0,06 | | |
| Fluxo de $CO_2$ | 0,03 | -0,04 | 0,01 | 0,01 | |
| Umidade | -0,51* | 0,52* | 0,03 | -0,34* | -0,08 |
| **Feijão guandu** | | | | | |
| Silte | -0,92* | | | | |
| Argila | -0,22* | -0,17* | | | |
| Temperatura | -0,30* | 0,30* | 0,01 | | |
| Fluxo de $CO_2$ | -0,31* | 0,25* | 0,17* | 0,07 | |
| Umidade | -0,44* | 0,39* | 0,14* | -0,06 | -0,03 |
| **Pastagem** | | | | | |
| Silte | -0,88* | | | | |
| Argila | -0,05 | -0,44* | | | |
| Temperatura | -0,27* | 0,25* | -0,01 | | |
| Fluxo de $CO_2$ | 0,17* | -0,08 | -0,15* | 0,03 | |
| Umidade | -0,51* | 0,51* | -0,12 | 0,10 | -0,03 |

* Correlação de Pearson significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 4. Análise de correlação dos atributos granulométricos, emissão de $CO_2$, temperatura e umidade do solo nas áreas de Terra Preta Arqueológicas na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

A hipótese mais provável da baixa emissão de $CO_2$ sob FN é a baixa temperatura e o excesso de umidade em comparação às áreas de FJ e PT, além dos baixos teores de MO e do EC (Tabela 2). Outra influência para a variação espacial da emissão de $CO_2$ do solo diz respeito às características texturais do solo. Sotta et al. (2006), verificaram que a emissão de $CO_2$ é 21% maior em solos com maior teor de areia do que em solos argilosos. Entretanto, os mesmos autores confirmaram maior variação da umidade do solo em solos argilosos. Por outro lado, em solos com maior concentração de silte e argila, a temperatuda do solo nas camadas superficiais e subsuperficiais apresentam maiores flutuações, como consequência do elevado número de microporos e maior capacidade de reterção da água no solo (Carneiro et al., 2014).

A variabilidade espacial e temporal da emissão de $CO_2$ do solo envolve uma gama de variáveis dependentes de vários fatores, que pode justificar sua complexidade na modelagem dos atributo em paisagens distintas (Sotta et al., 2006; Rodeghiero and Cescatti ,2008; Fiener et al., 2012). No entanto, para o presentente estudo, não foram constatado pelo semivariograma cruzado uma dependência espacial do $FCO_2$ correlacionados entre os atributos da Tabela 2.

Os coeficientes de assimetria e curtose para o $FCO_2$, TS e US (Tabela 3), em todas as áreas deste estudo, indicaram uma distribuição das variáveis próximo à distribuição normal (coeficientes iguais a zero). Por outro lado, a normalidade dos dados não é um pressuposto necessário para a aplicação de técnica geoestatística, mas sim que a distribuição não apresente caudas muito alongadas, o que poderia comprometer a análise (Oliveira et al., 2015a).

A temperatura do solo apresentou baixo coeficiente de variação, segundo os critérios de Warrick e Nielsen (1980), o que é um indicativo da heterogeneidade dos dados (Tabela 3). Assim, a TS teve uma variação entre 1,6 a 3,0 %, com maior homogeneidade dos dados para os pontos de amostragem, o que diferiu para os casos da US e $FCO_2$, cujo primeiro apresentou um CV mediano com valores entre 16,4 a 17,4%, e o segundo, com alta variação (CV entre 29,3 a 31,4 %) entre os pontos de amostragem. Esses resultados são compatíveis aos valores relatados em ambientes de floresta tropical na Amazônia (Silva et al., 2016).

O comportamento do CV para os atributos do solo estudados pode ser útil na comparação da variação desses atributos com unidades distintas. No entanto, para a avaliação da variabilidade espacial desses atributos, foram calculados a semivariância entre os pontos de amostragem, cujos modelos ajustados no semivariograma experimental foram utilizados na krigagem para estimar valores de atributos em pontos não amostrados dentro da malha.

Foi observada variabilidade espacial para o $FCO_2$, TS e US para as áreas em estudo (Tabela 5 e Figuras 2, 3 e 4). O $FCO_2$ apresentou um grau de dependência espacial forte para área de FN, diferindo das áreas de FJ e PT, que apresentaram uma variabilidade espacial moderada, segundo a classificação de Cambardella et al. (1994).

| **Áreas** | Modelo | $C_0$ | $C_0 + C_1$ | GDE (%) | a (m) | SQR | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | **Emissão de $CO_2$ (µmol $m^{-2}s^{-1}$)** | | | | |
| Floresta natural | Exp | 0,05 | 0,27 | 18,52 | 25,80 | 7,94 E-03 | 0,75 |
| Feijão guandu | Exp | 0,21 | 0,43 | 48,83 | 10,00 | 1,19 E-02 | 0,58 |
| Pastagem | Esf | 0,27 | 0,54 | 50,00 | 43,30 | 1,06 E-02 | 0,84 |
| | | | **Temperatura do solo (°C)** | | | | |
| Floresta natural | Esf | 0,02 | 0,21 | 9,52 | 36,80 | 7,28 E-03 | 0,84 |
| Feijão guandu | Esf | 0,07 | 0,19 | 36,84 | 23,10 | 3,24 E-03 | 0,80 |
| Pastagem | Esf | 0,47 | 0,71 | 66,20 | 68,69 | 3,78 E-02 | 0,76 |
| | | | **Umidade do solo (% volume)** | | | | |
| Floresta natural | Esf | 4,99 | 15,01 | 33,24 | 44,09 | 6,64 | 0,95 |
| Feijão guandu | Esf | 4,56 | 9,60 | 47,50 | 21,00 | 11,8 | 0,65 |

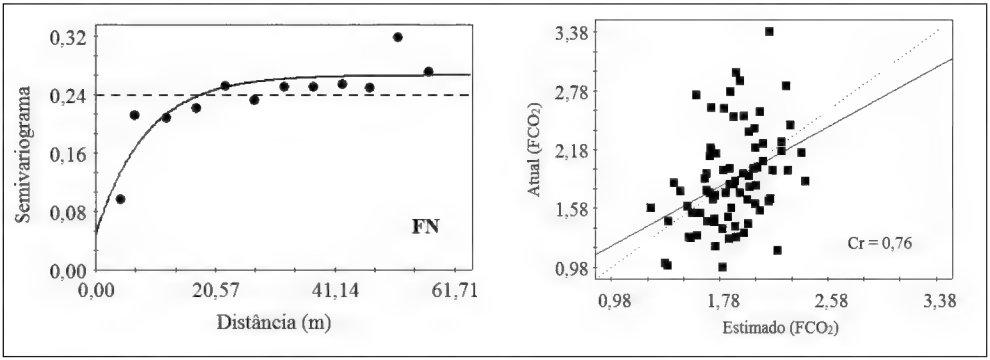
| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pastagem | Exp | 0,99 | 8,41 | 11,77 | 20,70 | 1,94 | 0,80 |

FN = floresta natural; FJ =feijão guandu; PT =pastagem.Modelos = esférico (Esf) e exponencial (Exp);$C_0$ = efeito pepita; $C_0 + C_1$ = patamar; a = alcance;GDE = grau de dependência espacial;SQR = soma do quadrado do resíduo; $R^2$ = coeficiente de determinação.

Tabela 5. Parâmetros dos modelos ajustados do semivariograma para a emissão de $CO_2$, temperatura do solo e umidade do solo nas áreas de Terra Preta Arqueológicas na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

No presente trabalho, a análise do semivariograma cruzado não evidenciou influência da TS e US nos padrões de distribuição do $FCO_2$ sob as áreas em estudo. Entretanto, em outros trabalhos a variabilidade espacial da emissão de $CO_2$ foi afetada principalmente pela umidade do solo (Panosso et al., 2009), cujo estudos foram realizados em um Latossolo desprovido de vegetação. Kosugi et al. (2007), em estudo da variabilidade espacial da emissão de $CO_2$ do solo em floresta tropical, também constataram que a umidade do solo foi fator determinante na variabilidade espacial do $FCO_2$. O que distingue os solos de TPA em relação aos adjacentes é o elevado teor de matéria orgânica estável e elevados teores de nutrientes, além de alta atividade microbiana, o que pode justificar a complexidade em avaliar o padrão de variabilidade da emissão do $CO_2$ nesses solos.

Com base aos ajustes do modelo do semivariograma experimental, verificaram-se semelhanças no comportamento do $FCO_2$ entre as áreas de FN e FJ, com ajuste do modelo exponencial, enquanto a área de PT teve seu ajuste ao modelo esférico, ambos levando em consideração ao menor resíduo (Tabela 5). Os modelos apresentaram bons ajustes, com coeficientes de determinação ($R^2$) variando entre 0,58 a 0,84. Na validação cruzada (Figura 2), os valores estimados apresentaram correlações acima de 0,76, justificando a predição dos modelos com os dados originais. O alcance de dependência espacial do $FCO_2$ (Figura 2) foram menores que a distância máxima ao qual o variograma foi definido, com alcances de correlação espacial entre 10,00 m para o FJ, a 43,30 m para a PT.



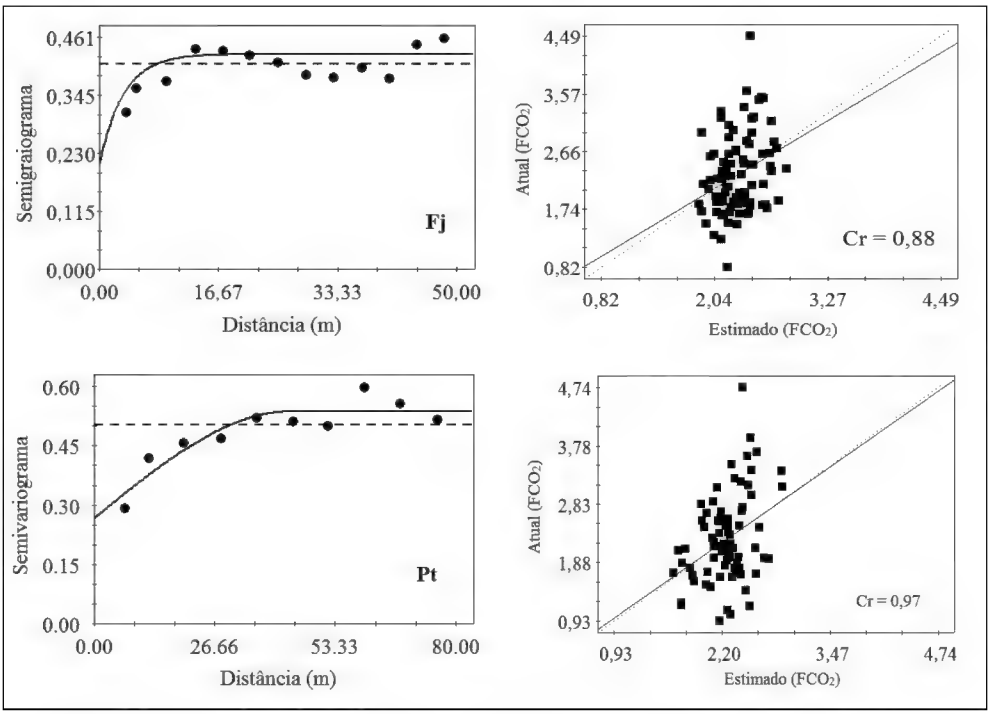



**Figura 3.** Semivariogramas experimentais e modelos ajustados para a emissão de $CO_2$ do solo nas áreas de Terra Preta Arqueológicas na região de Novo Aripuanã, Amazonas. FN =floresta natural; FJ =feijão guandu; PT =pastagem.

A TS apresentou modelos de ajuste predominantemente esférico, com GDE forte para FN e moderado para FJ e PT. Os ajustes dos modelos foram adequados, com erros de residuais mínimos e coeficientes de determinação variando entre 0,76 a 0,84 (Tabela 5). As correlações obtidas pela validação cruzada (Figura 3) mostraram-se convincentes para a precisão dos modelos. Os alcances de correlação espacial entre os pontos foram acima de 23,10 m e muito inferior à distância máxima proposta pelo variograma. Por outro lado, nas áreas de FJ e PT, foram necessárias à retirada da tendência em termos das coordenadas espaciais, devido à violação da hipótese intrínseca do semivariograma experimental e, calculadas os semivariogramas a partir dos resíduos.

Os resultados apresentam concordâncias aos propostos por Panosso et al. (2009) para uma área desprovida de vegetação e que apresenta um controle de irrigação, ao qual após a irrigação da área, a dependência espacial alcançou até 20 m com modelo gaussiano do ajuste para o semivariograma experimental. Em outro trabalho, sobre cultivo de cana-de-açúcar sob manejo, a temperatura do solo resultou em uma variabilidade com alcance de até 77 m para modelos esféricos sob cana queimada e exponencial sob cana crua (Panosso et al., 2008).

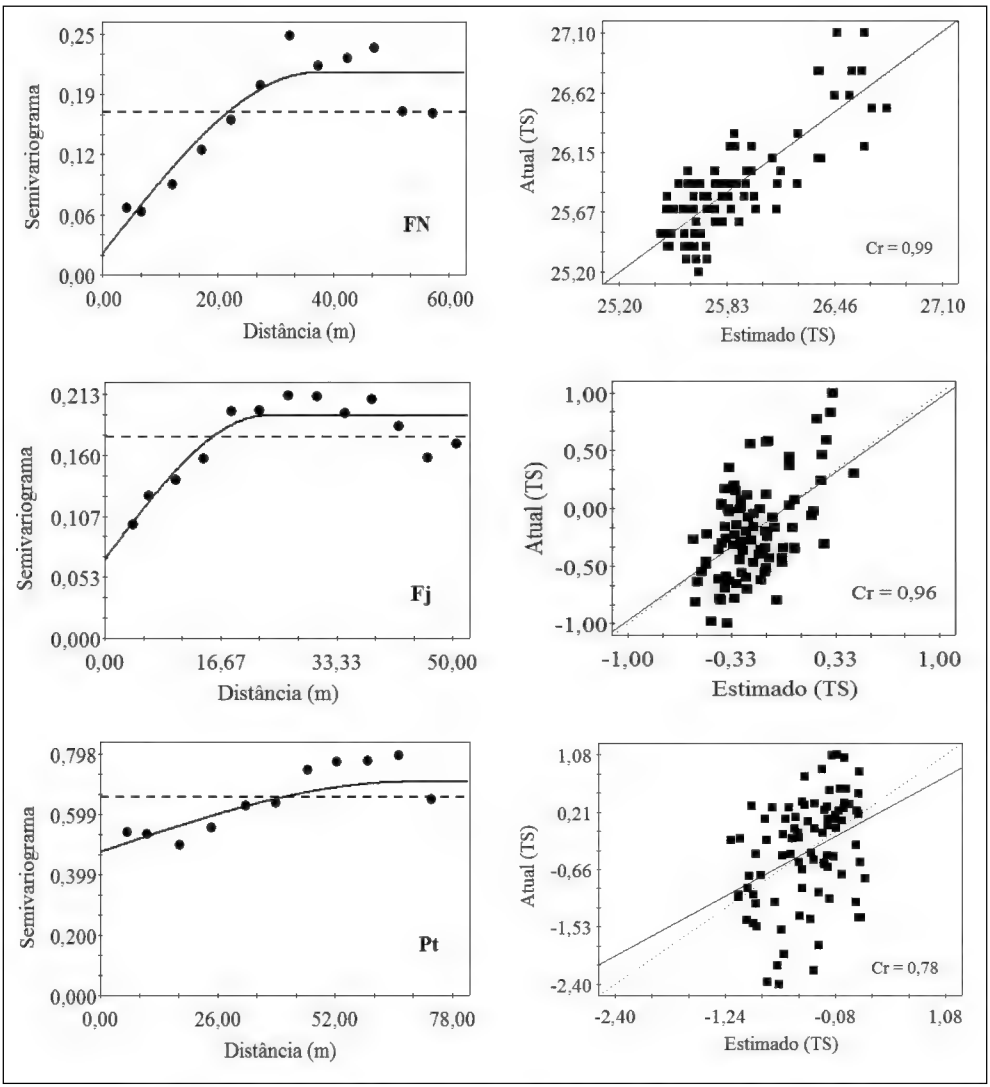



Figura 4. Semivariogramas experimentais e modelos ajustados para a temperatura do solo nas áreas de Terra Preta Arqueológicas na região de Novo Aripuanã, Amazonas. FN =floresta natural; FJ =feijão guandu; PT =pastagem.

Para a US os modelos de ajuste dos semivariogramas experimentais foram o esférico para a FN e FJ e o exponencial para a PT (Tabela 5 e Figura 4). Em contrate aos resultados encontrados nas áreas com FJ e PT, a US obteve uma estabilidade da curva do semivariograma experimental para a área sob FN, com correlação espacial acima de 44 m. Apesar de elevados valores para o erro residual (SQR) em comparação aos demais atributos, a validação cruzada foi superior, promovendo correlações acima de 0,93. Altos valores para o SQR também foram encontrados por Panosso et al. (2008 e 2009).

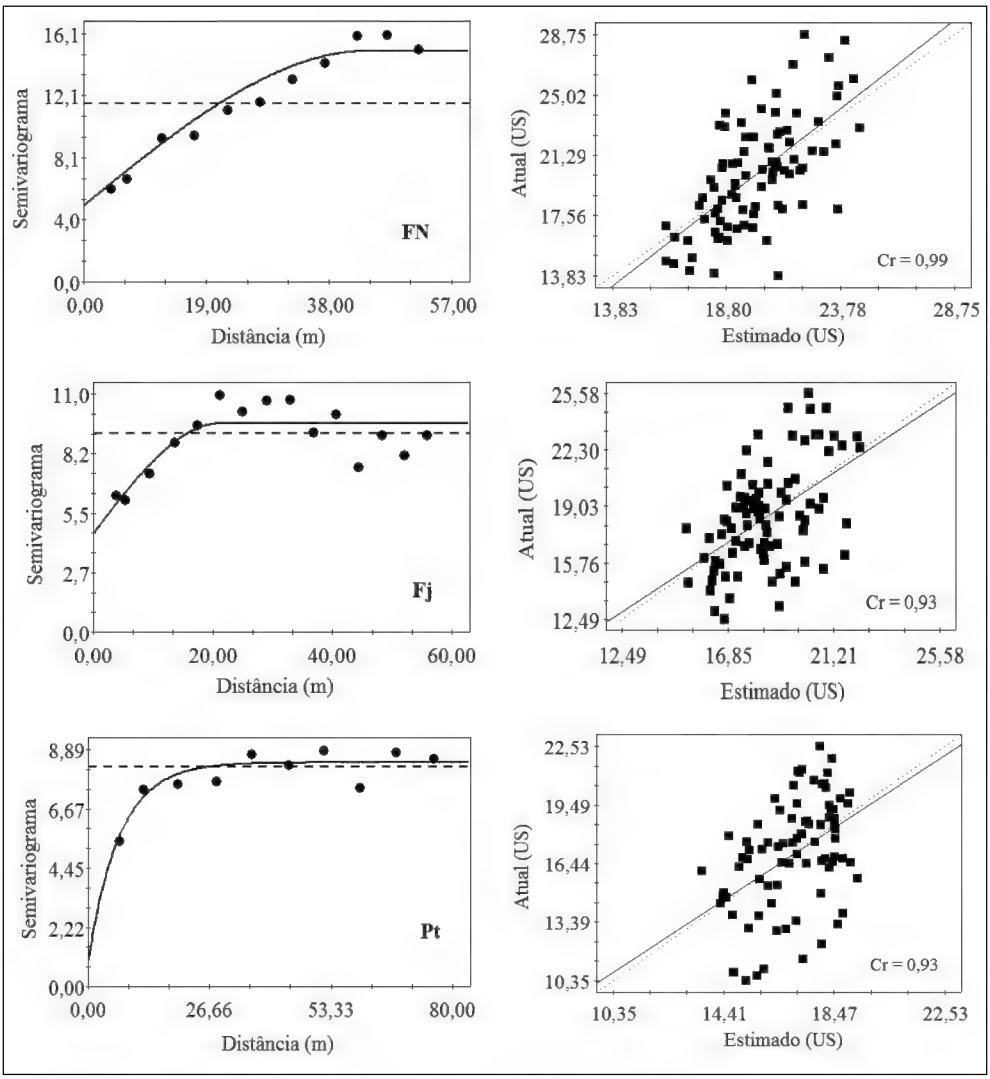



Figura 5. Semivariogramas experimentais e modelos ajustados para a umidade do solo nas áreas de Terra Preta Arqueológicas na região de Novo Aripuanã, Amazonas. FN =floresta natural; FJ =feijão guandu; PT =pastagem.

Na área sob floresta, a distribuição de valores do $FCO_2$ (Figura 5B) não indica uma tendência de concentração, mas há uma predominância de valores entre 1,13 a 1,49 **µmol m$^{-2}$s$^{-1}$**, concomitantemente com valores dominantes mais baixos para a TS (25,4 a 26,0 °C) e US (15,6 a 19,5%). A distribuição espacial do $FCO_2$ promoveu correlação positiva significativa ($p<0,05$) com a US (Cr= 0,41) e correlação negativa com a TS (Cr =-0,27), indicando que ambos influenciaram na variabilidade espacial do $FCO_2$ do solo, mas com maior influência da US sob a área em estudo.A TS e US para a área de FN reproduziram um comportamento mais tendencioso de concentração entre os maiores valores de TS para

menores valores de US em locais específicos (Figura 5B e 5C),podendo ser corroborados pela correlação negativa (Cr = -0,48) entre os mapas desses atributos, concordando com o trabalho proposto por Panosso et al. (2009).

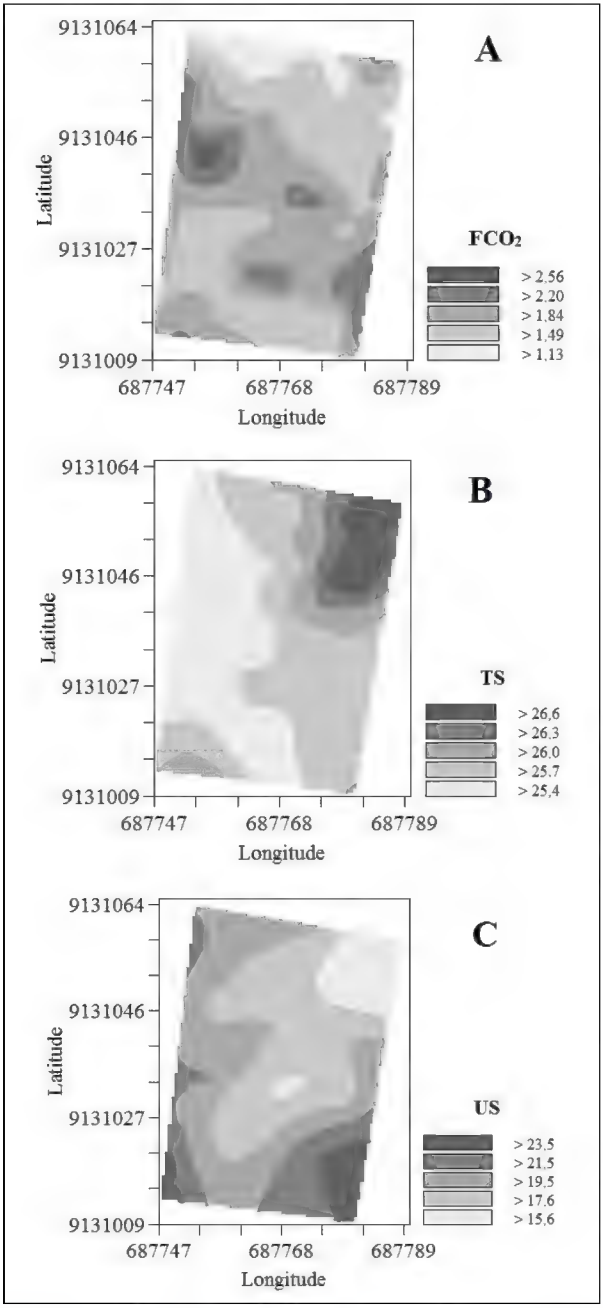



Figura 2. Mapas de padrão espacial do$FCO_2$ (A), TS (B) e US (C) nas áreas de Terra Preta Arqueológicas sob floresta natural na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

Por outro lado, a área de feijão guandu há um padrão de distribuição espacial tendencioso entre o $FCO_2$ e US, de altos valores da emissão de $CO_2$ para altos valores da umidade do solo, promovendo correlações positivas (Cr = 0,32) entre ambos (Figura 6). Dentre os fatores que podem ter influenciado, destaca-se principalmente o tipo de cobertura do solo, além de raízes das plantas mais superficiais em comparação aos da FN. A incidência de chuvas horas anterior à leitura de dados podem ter contribuído para essa variação, ao qual o molhamento do solo pode ter promovido a substituição do gás entre os espaços porosos do solo, aumentando assim a emissão de $CO_2$ pelo solo. Assim, há uma predominância de valores entre 1,60 a 2,28 µmol $m^{-2}s^{-1}$ para o $FCO_2$ combinado de 15,0 a 18,0% para a US.

Na área de FJ, a TS promoveu correlações positivas (Cr = 0,34) com o $FCO_2$, ao contrário do avaliado em FN, que apresentou correlação negativa, e não houve correlações significativas ($p>0,05$) entre a TS e a US na área do FJ (Figura 7). A textura do solo é um fator determinante intrínseco para a temperatura do solo, sendo que em solos mais arenosos promovem menor condutividade térmica no solo, que também pode ser uma justificativa da falta de correlação entre a TS e US sobre a mesma área.Em adição, o silte e a argila promovem um aumento elevado do número de microporos nos solos, que por sua vez apresenta maior capacidade de retenção de água no solo, o que acarreta no aumento da difusividade térmica **(**Carneiro et al., 2014**).** Assim, conforme apresentado na Tabela 4, o teor de silte e argila sob FN foi maior do que nas demais áreas, representando mais do que 29% do total das classes texturais de FN, enquanto que o FJ e PT representam cerca de 23% e 25%, respectivamente.

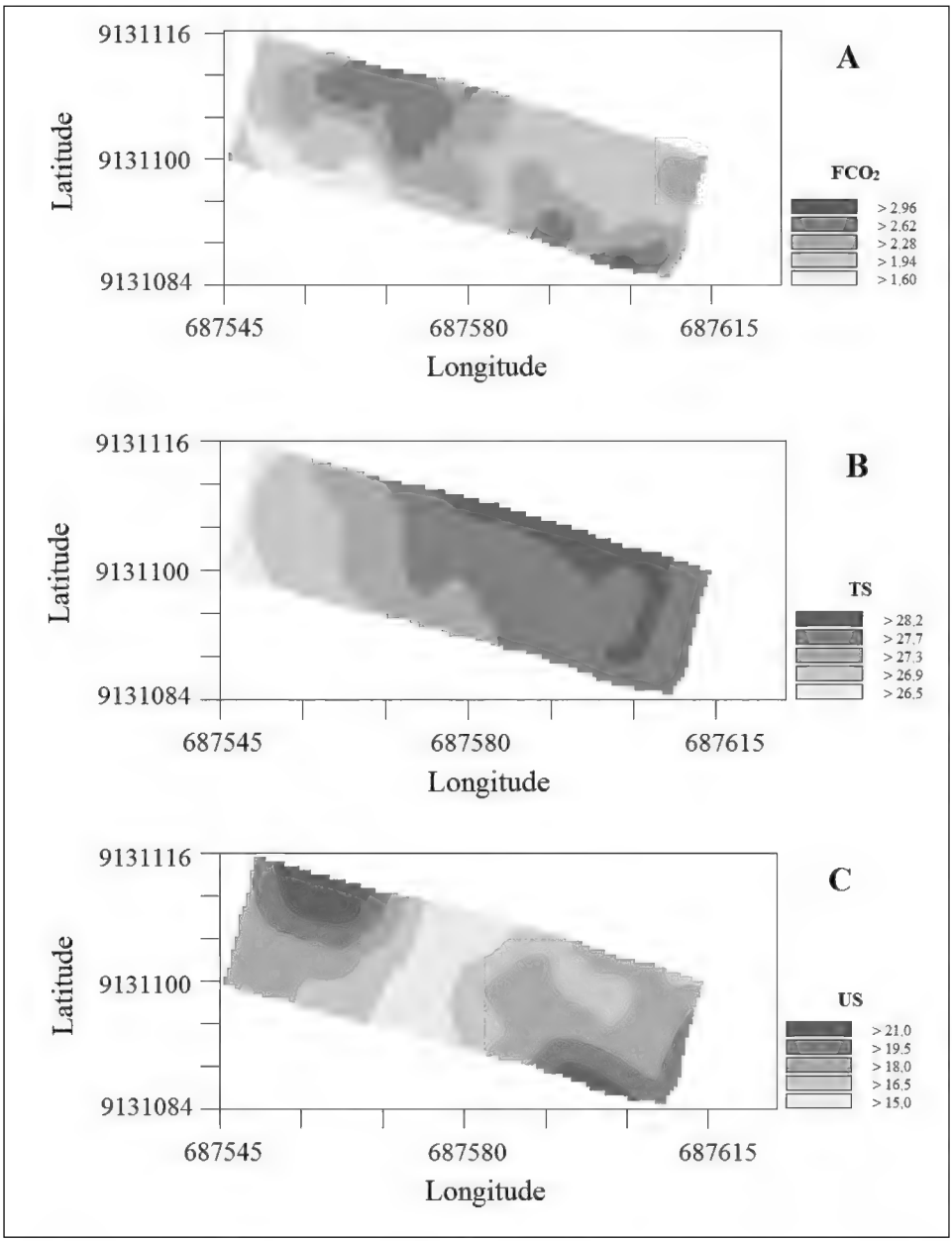



Figura 7. Mapas de padrão espacial da emissão de $CO_2$ (A), temperatura do solo (B) e umidade do solo (C) nas áreas de Terra Preta Arqueológicas sob feijão guandu na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

Sob a área de PT (Figura 8), os padrões da distribuição dos valores de $FCO_2$, TS e US não promoveram associação, com características bem distintas na configuração do ambiente. Assim, houve predominância de valores baixos de $FCO_2$ (entre 1,55 a 2,17µmol $m^{-2}s^{-1}$) e TS (26,5 a 27,6 °C), mas com padrões de distribuição distintos da US em relação

às áreas de FN e FJ, com predominância de valores mais elevados (11,4 a 17,4%). Houve correlação positiva (Cr = 0,26) da distribuição do $FCO_2$ com a US, não apresentando significância (p>0,05) entre essas e a TS.

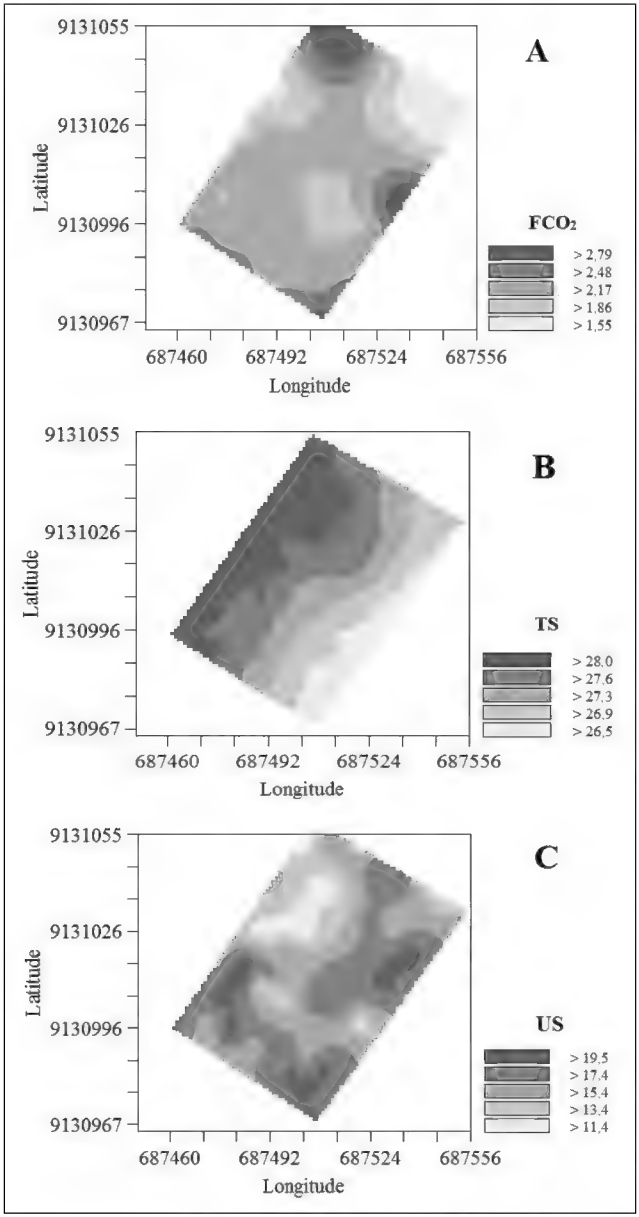



Figura 8. Mapas de padrão espacial da emissão de $CO_2$ (A), temperatura do solo (B) e umidade do solo (C) nas áreas de Terra Preta Arqueológicas sob pastagem na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

Conforme elucidado, o tipo de cobertura do solo, associado ao uso e manejo do solo, promoveu características distintas entre os ambientes quanto ao $FCO_2$, assim com a TS e US, consequências essas associadas às alterações dos atributos físicos do solo, principalmente quanto à porosidade e a textura, além das variações do teor de matéria orgânica.Assim como na área de FJ, o tipo de cobertura do solo, além das características texturais, podem ter corroborado para o padrão de distribuição do $FCO_2$ sob a área de PT.

## 4 I CONCLUSÕES

Foi observada variabilidade espacial para a $FCO_2$, TS e US, com GDE para a $FCO_2$ e TS fortes para a área de floresta e moderado para as áreas do feijão guandu e pastagem, enquanto para a US apresentou GDE moderado para floresta e feijão guandu, mas forte para pastagem.

Menores alcances de correlação espacial do $FCO_2$, TS e US para a área sob feijão guandu. Maiores alcances de correlação de $FCO_2$ e TS foram para a área sob pastagem, e da US sob a área de floresta. Os modelos de ajuste do semivariograma foi o esférico, com exceção do $FCO_2$ para as áreas de floresta e feijão guandu, e da US sob a área de pastagem, com modelo de ajuste exponencial.

Os mapas dos padrões de distribuição espacial indicam uma tendência de concentração entre os atributos avaliados, apresentando correlações positiva entre $FCO_2$ com US, e negativa com a TS, sob a área de FN. Sob o FJ, o padrão de distribuição do $FCO_2$ correlacionou positivamente tanto com a TS como a US, mas para a PT, houve correlação do $FCO_2$ apenas com a US.

## REFERÊNCIAS


Almagro M, López J, Querejeta JI, Martínez-Mena M (2009) Temperature dependence of soil $CO_2$ efflux is strongly modulated by seasonal patterns of moisture availability in a Mediterranean ecosystem. **Soil Biology & Biochemistry**. 41:594-605.

Aquino RE, Campos MCC, Junior JM, Oliveira IA, Teixeira DDB, Cunha JM (2015) Use of scaled semivariograms in the planning sample of soil physical properties in southern Amazonas, Brazil. **R Bras Ci Solo.** 39:21-30.

Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF, Konopka AE (1994) Field-scale variability of soil properties in Central Iowa. **Soil Sci Soc Am J.** 58: 1501-1511.

Carneiro RG, Moura MAL, Silva VPR, Silva Junior RS, Andrade AMD, Santos AB (2014) Variabilidade da temperatura do solo em função da liteiraem fragmento remanescente de mata atlântica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** 18 (1): 99-108.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2011) Centro Nacional de Pesquisa do Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. 2nd ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solo.

Fiener P, Dlugob V, Korres W, Schneider K (2012) **Spatial variability of soil respiration in a small agricultural watershed – Are patterns of soil redistribution important?** Catena. 94: 3-16. doi:10.1016/j.catena.2011.05.014

Herbst M, Hellebrand HJ, Bauer J, Huisman JA, Simunek J, Weihermüller L, Graf A, Vanderborght J, Vereecken H (2008) Multi-year heterotrophic soil respiration: evaluation of a coupled $CO_2$ transport and carbon turnover model. **Ecol. Mod.** 214: 271-283.

Kämpf N, Kern DC (2005) **O solo como registro da ocupação humana pré-histórica na Amazônia**. In: Vidal-Torrado P, Alleoni LRF, Cooper M, Silva AP, Cardoso EJ (Eds). **Tópicos em Ciência do solo.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.277-320.

Kosugi Y, Mitani T, Itho M, Noguchi S, Tani M, Matsou N, Takanashi S, Ohkubo S, Nik AR (2007) Spatial and temporal variation in soil respiration in a Southeast Asian tropical rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology.** 147: 35-47.

Lima HN, Schaefer CEGR, Kämpf N, Costa ML, Souza KW (2009) **Características Químicas e Mineralógicas e a Distribuição de Fontes de Fósforo em Terras Pretas de Índio da Amazônia Ocidental. In: As Terras Pretas de índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas.** Teixeira WG, Kern DC, Madari BE, Lima HN, Woods W. Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus, AM, Capítulo de livro. p. 212-224.

Mariko S, Urano T, Asanuma J (2007) Effects of irrigation on $CO_2$ and CH4 fluxes from Mongolian steppe soil. **Journal of Hydrology**. 333(1):118-123.

Oliveira IA, Junior JM, Campos MCC, Aquino RE, Freitas L, Siqueira DS, Cunha JM (2015a) Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de Argissolos da região de Manicoré, AM. **R Bras Ci Solo**. 39:668-681.

Oliveira IA, Campos MCC, Marques Junior J, Aquino RE, Teixeira DB, Silva DMP (2015b) Use of scaled semivariograms in the planning sample of soil chemical properties in southern Amazonas, Brazil. **R Bras de Ci Solo**. 39: 31-39.

Panosso AR, Pereira GT, Júnior JM, Júnior, NLS (2008) Variabilidade espacial da emissão de $CO_2$ em Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. **Eng. Agríc.** 28(2): 227-236.

Panosso AR, Ribeiro CER, Zanini JR, Pavani LC, Pereira GT, Júnior NLS (2009) Variabilidade espacial da emissão de CO2, da temperatura e umidade de um latossolo desprovido de vegetação sob diferentes lâminas de molhamento. **Semina: Ciências Agrárias**. 30(1): 1017-1034.

Pinto-Junior OB, Sanches L, Dalmolin AC, Nogueira JS (2009) Efluxo de $CO_2$ do solo em floresta de transição Amazônia Cerrado e em área de pastagem. **ActaAmazônica.** 39(4): 813-822.

Rodeghiero M, Cescatti A (2008) Spatial variability and optimal sampling strategy of soil respiration. **Forest Ecology and Management.** 255: 106-112. doi:10.1016/j.foreco.2007.08.025

Schwendenmann L, Veldkamp E, Brenes T, O'Brien JJ, Mackensen J (2003) Spatial and temporal variation in soil $CO_2$ efflux in an old-growth neotropical rainforest, La Selva, Costa Rica. **Biogeochemistry.** 64:111-128.

Silva LC, Cunha JM, Machado NG, Campos MCC, Biudes MS (2015) Estimativa do balanço de radiação por sensoriamento remoto de diferentes usos de solo no sudoeste da Amazônia brasileira. **Sociedade & Natureza**. 27 (2): 341-356.

Silva CM, Vasconcelos SS, Mourão Júnior M, Bispo CLC, Kato OR, Silva Junior AC, Castellani DC (2016) Variação temporal do efluxo de $CO_2$ em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia Oriental. **Acta Amazônica**. 46(1): 1-12.

Sotta ED, Veldkamp E, Guimarães BR, Paixão RK, Ruivo MLP, Almeida SS (2006). Landscape and climatic controls on spatial and temporal variation in soil CO2 efflux in an Eastern Amazonian Rainforest, Caxiuanã, Brazil. **Forest Ecology and Management**. 237:57-64. doi:10.1016/j. foreco.2006.09.027

Tang X, Zhou G, Liu S, Zhang D, Liu S, Li J, Zhou C (2006) Dependence of Soil Respiration on Soil Temperature and Soil Moisture in Successional Forests in Southern China. **Journal of Integrative Plant Biology.** 48 (6): 654-663.

Warrick AW, Nielsen DR (1980) Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel D, editor. Applications of soil physics. **New York: Academic Press**. p.319-344.

Yeomans JC, Bremner JM (1988) A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis.** 19: 1467-76.

Zhou X, Sherry R, An Y, Wallace LL, Luo Y (2006) Main and interactive effects of warming, clipping, and doubled precipitation on soil $CO_2$ efflux in a grassland ecosystem. **Global Biogeochemical Cycles.** 20: GB1003. doi: 10.1029/ 2005GB002526.

# CAPÍTULO 5

# DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO EFLUXO DE $CO_2$ EM ÁREA DE TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA SOB CULTIVO DE CACAU E CAFÉ NO MUNICÍPIO DE APUÍ, AM

*Data de aceite: 18/05/2021*
*Data de submissão: 11/05/2021*

**Milton César Costa Campos**
Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal da Paraíba
Areia - Paraíba
https://orcid.org/0000-0002-8183-7069

**Leandro Coutinho Alho**
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas
Lábrea - Amazonas
http://lattes.cnpq.br/4670525420962987

**Marcelo Dayron Rodrigues Soares**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
https://orcid.org/0000-0003-2942-5320

**Diogo André Pinheiro da Silva**
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte - Minas Gerais
http://lattes.cnpq.br/0079324783840272

**José Maurício da Cunha**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://lattes.cnpq.br/3425545536495518

**Douglas Marcelo Pinheiro da Silva**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://lattes.cnpq.br/6219916883682579

**RESUMO**: As Terras Pretas Arqueológicas (TPA) são solos que podem concentrar até seis vezes mais carbono orgânico que solos adjacentes sem horizonte A antrópico, presumindo-se, dessa forma, maior efluxo de $CO_2$ nesses solos. O objetivo deste estudo foi investigar a distribuição espacial do efluxo de $CO_2$, temperatura e umidade do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau e café no município de Apuí, AM, Brasil. Foram construídas malhas amostrais nas dimensões 42 x 80 m, com espaço entre os pontos de 8 x 10 m e 6 x 10 m para as áreas de cacau e café, respectivamente. Após a etapa de coleta dos dados do efluxo de $CO_2$, temperatura e umidade do solo, procedeu-se a análise estatística descritiva e geoestatística. Os resultados mostraram que os parâmetros avaliados apresentam dependência espacial, com alcance variando de 25 a 40 m para o efluxo de $CO_2$ da área TPA com cacau. O efluxo de $CO_2$ na área de cacau foi superior, com valor médio de 5,49 µmol m-2 s-1, comparado ao 3,99 µmol m-2 s-1 de $CO_2$ da área com café.

**PALAVRAS-CHAVE**: Carbono orgânico, efluxo de $CO_2$, solo antrópico.

## SPATIAL DISTRIBUTION OF THE CO2 STREAM IN ARCHAEOLOGICAL DARK EARTH AREA UNDER COCOA AND COFFEE CULTIVATION IN THE MUNICIPALITY OF APUÍ, AM, BRAZIL

**ABSTRACT**: The Archaeological Dark Earth (ADE) are soils that can hold up to six times more organic carbon than surrounding soils without anthropic horizons, thus assuming higher $CO_2$ emissions from these soils. The objective of this

study was to investigate the spatial distribution of $CO_2$ efflux, temperature and soil moisture in an Archaeological Dark Earth area under cocoa and coffee cultivation in the municipality of Apuí, AM, Brazil. Sample grids of 42 x 80 m were set up, with space between points of 8 x 6 x 10 m and 10 m, respectively, for the cocoa and coffee areas. After data of $CO_2$ efflux, temperature and humidity of the soil were collected, descriptive statistics and geostatistics analyses were done. The results showed that the evaluated parameters exhibited spatial dependence reaching a range of 25 to 40 m for $CO_2$ stream ADE area with cocoa. The $CO_2$ efflux in the cocoa area was higher, with an average value of 5.49 µmol m-2 s-1, compared to 3.99 µmol m-2 s-1 in the area of coffee $CO_2$.
**KEYWORDS**: Antropic soil, $CO_2$ efflux, organic carbon.

## 1 I INTRODUÇÃO

Na Amazônia, os solos que apresentam horizonte A antrópico estão associados à prolongada ocupação humana pré-histórica, constituídas de sociedades indígenas do período pré-colombiano (EMBRAPA 2013). As quais formaram extensos depósitos de resíduos, ou simplesmente rejeitos, que alteraram significativamente as propriedades dos solos (Aquino et al. 2016), de modo que os solos desses ambientes apresentam variações expressivas nas propriedades físicas, químicas, biológicas e mineralógicas comparados aos solos adjacentes.

No tocante, os vestígios mais contundentes, com ampla distribuição, são as manchas de solos de cor negra, atribuída a elevada presença de matéria orgânica e pela contribuição significativa do carbono pirogênico, formado por oxidação incompleta dos materiais orgânicos (Campos et al. 2012a). Estes exibem alta resistência à oxidação termal, química e à foto-oxidação fatores que atribuíram a esses solos algumas designações, como Terra Preta Arqueológica (TPA) ou simplesmente Terra Preta (Kampf e Kern 2005).

É sabido que as maiores reservas de carbono (C) no ecossistema terrestre encontram-se no solo, chegando a ser 4 vezes maiores que o C da vegetação e 3,3 vezes maiores que o da atmosfera (IPCC 2007). As TPAs por sua vez, podem apresentam em média até 6 vezes mais carbono orgânico estável que os solos adjacentes sem horizonte A antrópico (Glaser 2001), figurando como grande reservatório de carbono orgânico, entretanto a modificação da cobertura da vegetação nativa por meio das ações antrópicas atuais é possível que haja perdas massivas de C do solo (La Scala Junior et al. 2012).

As ações de perda de $CO_2$ do solo são representadas pelas trocas gasosas entre o solo e a atmosfera, e governadas pela difusão do $CO_2$ por meio dos poros do solo, que podem ser influenciadas pelas propriedades do solo ou pela cobertura vegetal presente no local (Pinto Júnior et al. 2009). As variáveis climáticas têm relações diretas nos efluxos de $CO_2$ para a atmosfera. Desse modo, os principais fatores que afetam as emissões são a temperatura (do ar e do solo) e o teor de umidade do solo, adicionado às relações climáticas e topográficas do local (Brito et al. 2010).

Por outro lado, o estudo da variabilidade espacial por meio da geoestatística

possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem, permitindo indicar alternativas de uso, além de permitir melhor compreensão da variabilidade dos atributos e sua influência no ambiente (Silva Neto et al. 2012). Porém, a variabilidade espacial não se restringe apenas aos atributos do solo, ocorrendo também sob a emissão de $CO_2$ (Pinto Junior et al. 2009).

Vários são os estudos de variabilidade espacial do efluxo de $CO_2$, espacialmente em áreas florestais nativas em comparação a demais sistemas de uso conforme destacam La Scala Júnior et al. (2012) em estudos em área de cana-de-açúcar. Segundo La Scala Junior et al. (2009) o aumento das emissões de $CO_2$ ocorre nos meses mais quentes do ano (de outubro a fevereiro); o de acordo com Adachi (2009) é atribuído às condições favoráveis à atividade dos microrganismos do solo, a precipitação pluviométrica que interfere no padrão espacial e temporal das emissões de $CO_2$ do solo. Na Amazônia Pinto Junior et al. (2009) e Silva et al. (2016) informam que neste ambiente os fatores determinantes na variação espacial e temporal são temperatura e precipitação pois estes são bastante intensos na região.

Nesta parte da Amazônia as TPAs são facilmente identificadas e utilizadas por pequenos agricultores que as cultivam com frutíferas, hortaliças e pastagem em função de sua alta fertilidade (Campos et al. 2011) o que pode representar um risco ao ambiente com a perda desse importante reservatório de carbono. Assim o presente estudo teve como objetivo investigar a distribuição espacial do efluxo de $CO_2$ em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau e café no município de Apuí, AM.

## 2 I MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no município de Apuí, AM, situado em Latitude 7°12'05" S e Longitude 59°39'37" W, transpassado pela rodovia Transamazônica (BR-230) (Figura 1). Segundo a classificação de Köppen o clima da região pertence ao grupo A (Clima Tropical Chuvoso) e tipo climático Am (chuvas do tipo monção), apresentando um período seco de pequena duração. A pluviosidade limita-se as isoietas de 2.250 e 2.750 mm, com período chuvoso iniciando em outubro e prolongando-se até junho. As temperaturas médias anuais variam entre 25 e 27 °C e a umidade relativa entre 85 e 90%.

A geologia da região é oriunda dos arenitos da formação Beneficiente, recoberto por pacote argiloso do terciário. As classes de solo predominantes no município são os Argissolos e Latossolos, recobertos por vegetação primária, constituído predominantemente por Floresta Tropical Densa, formadas por árvores adensadas (SDS 2004).

A TPA sob cultivo de cacau vem sendo cultivado há quatorze anos, nos primeiros seis anos abrigou os cultivos de arroz, milho, feijão e melancia, e posteriormente foi inserido a cultura do cacau que permanece até o presente estudo. A TPA sob cultivo de café vem

sendo cultivada há seis anos, primeiros dois anos sob cultivo de pastagem e nos últimos quatro anos com a cultura do café, até o momento. O solo nas duas áreas de TPA no município de Apuí foram classificados como Argissolo Amarelo Eutrófico, segundo critérios estabelecidos por Embrapa (2013).

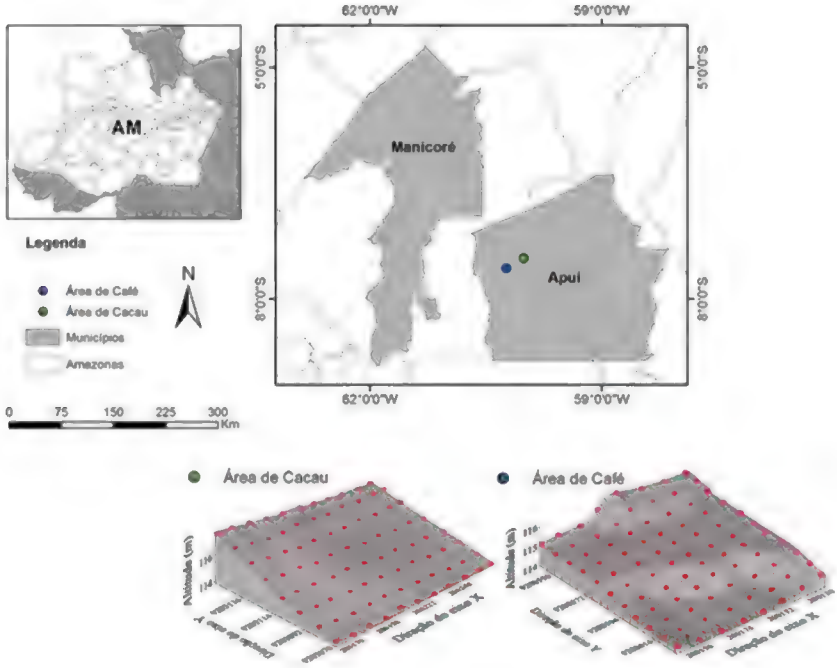



Figura 1. Mapa de localização das áreas comTerra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau e café no município de Apuí, AM.

Nesses locais, foi estabelecido um grid amostral na área com dimensões de 48 x 88 m com espaçamentos de 06 x 08 m, com 88 pontos em cada grid, e um total de 352 pontos amostrais (Figura 1). As medições do efluxo de $CO_2$, temperatura e umidade foram realizadas durante quatro dias consecutivos, sempre no período da manhã (entre 8:00 e 10:00), obtendo-se, ao final, um valor médio para cada ponto amostral da malha, sendo realizada as leituras apenas no período da manhã em função da distância e o difícil acesso entre as áreas estudadas.

A FCO2 foi registrada utilizando-se de um sistema portátil da companhia LI-COR (LI-8100), Nebraska EUA. Em seu modo de medição, o sistema monitora as mudanças na concentração de CO2 dentro da câmera, por meio de espectroscopia de absorção óptica na região do infravermelho (IRGA). A câmera para solos tem um volume interno de 854,2 $cm^3$, com área de contato de 83,7 $cm^2$, e foi colocada sobre colares de PCV previamente inseridos no solo, a uma profundidade de 3 cm em cada um dos pontos amostrais. Uma vez

a câmara fechada, o modo de medida levou 1 min 30 s, em cada ponto, para a determinação de $FCO_2$, em que a concentração de $CO_2$ dentro da câmara foi determinada a cada 2 s 30.

A temperatura do solo (Tsolo) foi monitorada por um sensor de temperatura (termistor portátil), parte integrante do sistema do LI-8100, inserido na camada de 0-12 cm de profundidade. A umidade do solo (Usolo) também foi medida em todos os pontos, utilizando-se de um sistema portátil TDR-Campbel® (Hydrosense TM, Campbell Scientific, Australia), que avaliou a umidade disponível do solo (% volume) na camada de 0-12 cm.

Próximo as áreas em estudo foram constatadas temperatura do ar, umidade do ar e precipitações médias diárias conforme a Tabela 1, utilizou-se as variáveis climáticas referente a região devido à ausência de unidade de estação meteorológica nas proximidades do local de estudo. Assim, leituras do $FCO_2$, TS e US foram feitas de 05 a 12 de dezembro de 2014 para as áreas de cacau e café, respectivamente.

| Data | Temperatura do ar °C | Umidade do ar % | Precipitação Acumulada (mm dia$^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| 05/12/2014 | 26,00 | 83,33 | 3,20 |
| 06/12/2014 | 24,61 | 87,96 | 32,55 |
| 07/12/2014 | 25,83 | 80,89 | 0,00 |
| 08/12/2014 | 27,36 | 76,53 | 2,12 |
| 09/12/2014 | 24,70 | 84,33 | 4,14 |
| 10/12/2014 | 25,10 | 77,98 | 0,55 |
| 11/12/2014 | 26,63 | 83,44 | 3,67 |
| 12/12/2014 | 27,06 | 85,13 | 31,23 |

Tabela 1. Média de dados climáticos de estações automáticas entre as regiões de Apuí e Manicoré, no estado do Amazonas.

Fonte: INMET, 2014.

Inicialmente os dados foram submetidos à análise estatística descritiva calculando-se a média, mediana, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, máximo, mínimo, coeficiente de assimetria, curtose e a hipótese de normalidade (Kolmogorov-Smirnov) pelo software estatístico Minitab 14 (Minitab 2000). Em seguida os dados também foram submetidos à análise de variância, e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, para verificar a diferença dos atributos entre áreas de TPAs sob cultivo de cacu e café. Além disso foi realizada a análise de correlação de Person.

Para a caracterização da variabilidade espacial, foi utilizada a análise geoestatística (ISAAKS & SRIVASTAVA 1989). Sob a teoria da hipótese intrínseca, onde o semivariograma experimental é estimado pela Equação:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

sendo:

γ(h) - valor da semivariância para uma distância h;

N(h): número de pares envolvidos no cálculo da semivariância;

Z(xi): valor do atributo Z na posição xi;

Z(xi+h): valor do atributo Z separado por uma distância h da posição xi.

O ajuste de um modelo matemático (exponencial, esférico, linear ou gaussiano), aos valores calculados de γ(h) foram definidos com base nos coeficientes do modelo teórico para o semivariograma: o efeito pepita ($C_0$); o patamar ($C_0 + C_1$) e o alcance (*a*).

Na análise da razão de dependência espacial (proporção em percentagem do ($C_0$) em relação ao ($C_0$+$C_1$)) das variáveis em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), onde valores de [($C_0$/($C_0$+$C_1$)] menores que 25% são considerados dependência espacial forte, valores de [($C_0$/($C_0$+$C_1$)] entre 25 e 75 % indicam dependência espacial moderada e valores de [($C_0$/($C_0$+$C_1$)] maiores que 75% dependência espacial fraca.

Na determinação da existência ou não da dependência espacial, utilizou-se a modelagem dos semivariogramas através do programa GS+ (Robertson, 1998). Tendo como base para a escolha do melhor ajuste do semivariograma respectivamente, o maior valor do coeficiente determinação ($r^2$) e validação cruzada. Após o ajuste dos modelos matemáticos permissíveis foi realizado à interpolação dos dados por meio da krigagem e em seguida a confecção dos mapas de isolinhas foram geradas no software Surfer versão 8.00.

## 3 I RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estatística descritiva e o teste de médias para o fluxo de $CO_2$, temperatura e umidade do solo são apresentados na tabela 2. As variáveis apresentaram valores de média e mediana próximos indicando distribuição normal. Os valores máximos e mínimos com maiores distanciamentos foram observados para o $FCO_2$ na área de TPA com cacau e Tsolo de ambas as áreas estudadas. Contudo, o valor máximo e mínimo do fluxo de $CO_2$ na área de TPA com cacau, cuja variação foi da ordem de 15,30 a 1,35 $\mu$mol $m^{-2}$, respectivamente, avaliado em conjunto com o valor de assimetria e curtose, explicam o valor do coeficiente de variação de 46,21% que representa alta variabilidade segundo classificação de Warrick e Nielsen (1980) para este parâmetro estatístico.

| Estatística | TPA com Cacau | | | TPA com Café | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $FCO_2$ | Tsolo | Usolo | $FCO_2$ | Tsolo | Usolo |
| | $\mu$mol $m^{-2}$ | °C | % | $\mu$mol $m^{-2}$ | °C | % |
| Média | 5,49a | 26,14a | 39,21b | 3,99 | 27,85a | 22,02b |
| Mediana | 5,13 | 26,15 | 39,50 | 3,88 | 27,82 | 22,00 |
| Mínimo | 15,30 | 26,62 | 49,00 | 2,43 | 26,64 | 14,75 |
| Máximo | 1,35 | 25,68 | 29,67 | 6,33 | 28,81 | 29,50 |
| Assimetria | 1,47 | 0,13 | 0,09 | 0,85 | -0,08 | 0,24 |
| Curtose | 3,52 | - 0,57 | - 0,50 | 0,26 | 0,25 | 0,43 |
| Desvio Padrão | 2,53 | 0,22 | 4,38 | 0,90 | 0,42 | 2,86 |
| CV (%) | 46,21 | 0,84 | 11,16 | 22,69 | 1,52 | 13,00 |
| Valor de p | 0,10 * | 0,07 | 0,06 | 0,01 | 0,20* | 0,20* |

$FCO_2$ = Fluxo de $CO_2$, T solo = Temperatura do solo, U solo = Umidade do solo, CV = Coeficiente de variação; d³= Teste de Kolmogorov Smirnov a 5% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 2. Testes de médias e estatística descritiva do fluxo de $CO_2$, temperatura e umidade do solo em Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau e café no município de Apuí, AM.

Resultados semelhantes foram encontrados por Schwendenmann et al. (2003), avaliando a variabilidade espacial e temporal do $FCO_2$ em solos de floresta tropical, observaram valores de CV entre 35 e 45%, e, Maier et al. (2011), que em estudo sobre a variabilidade espacial do efluxo de gases do efeito estufa, encontraram valores de coeficiente de variação de 55% para o $FCO_2$ em solo vegetado. Segundo Oliveira et al. (2015) o coeficiente de variação de atributos do solo de diferentes localizações dentro de um ecossistema é indicativo da sua variação espacial, mas, apenas o CV não é suficiente para a comparação entre atributo do solo de diferentes estudos, em parte, devido à falta de padronização no esquema experimental, como o tamanho e a forma da área, o número de pontos amostrais e o seu arranjo espacial.

A média do $FCO_2$ para a área de TPA com cacau foi de 5,49 $\mu$mol $m^{-2}$ $s^{-1}$ enquanto a área de TPA com café apresentou 3,99 $\mu$mol $m^{-2}$ $s^{-1}$ para o $FCO_2$ diferindo estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade (Tabela 2). Estes resultados devem-se possivelmente a estabilidade do sistema de cultivo com cacau (08 anos), espaçamento da cultura, maior acúmulo de serapilheira e maior aporte de C orgânico na área de cacau em relação a área de café. Apesar da diferenciação entre os dois sistemas de uso, essas médias do $FCO_2$ são superiores às médias descrita no trabalho de Silva et al. (2016) em áreas sob diferentes sistemas agroflorestais na Amazônia. Contudo, é provável que o maior $FCO_2$ nas áreas de TPA com cacau e café não esteja atribuída a cobertura vegetal dessas áreas, mas pelo maior teor de carbono orgânico encontrados nos solos com horizonte A antrópico (TPA) conforme mencionam Santos et al. (2013).

O $FCO_2$ é resultado da atividade microbiana e respiração das raízes, todavia, por

adição dos fatores ambientais temperatura e umidade pode sofrer aumento ou diminuição das emissões devido a variabilidade temporal conforme destacam Silva et al. (2016). Verifica-se também que a Tsolo apresentou valores médios idênticos estatisticamente nas duas áreas estudadas, variando 26,14 °C para área de cacau e 27,83 °C para área de café. Contudo, as áreas apresentaram teores de Usolo diferentes estatisticamente da ordem de 39,21% para área de TPA com cacau e 22,02% para área de TPA com café, fato que possivelmente está interferindo no $FCO_2$ conforme desta Simões et al. (2010) em estudos de carbono orgânico na Amazônia.

Por meio da análise ampla, permitida pela avaliação das médias, presume-se que o fator Usolo possa estar colaborando para o elevado $FCO_2$ da TPA com cacau, uma vez que o aumento da umidade favorece a atividade microbiana do solo (La Scala Júnior, 2009). Por outro lado, Tedeschi et al. (2006) afirmam a contribuição desses fatores não ser tão grande quando se analisa a variabilidade espacial.

De certo modo, somente a análise das médias não é suficiente para exibir a caracterização do $FCO_2$ ao longo de uma área, assim como a coadjuvância dos fatores temperatura e umidade nos níveis do efluxo. Para tanto, a caracterização fez-se por meio da análise geoestatística, cujos resultados são apresentados na Tabela 3. O $FCO_2$ e os parâmetros Tsolo e Usolo, tanto da área TPA com cacau como TPA com café, apresentaram dependência espacial, com ajustes matemáticos nos modelos esférico e exponencial.

| Parâmetros | TPA com cacau | | | TPA com café | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $FCO_2$ | Tsolo | Usolo | $FCO_2$ | Tsolo | Usolo |
| Modelo | Esf | Exp | Exp | Exp | Esf | Exp |
| Efeito Pepita | 0,19 | 1,70 | 0,01 | 0,42 | 0,03 | 2,62 |
| Patamar | 0,72 | 12,90 | 0,04 | 0,84 | 0,18 | 8,99 |
| Alcance (m) | 40,00 | 25,00 | 27,00 | 33,90 | 18,82 | 33,10 |
| [1]$R^2$ | 0,85 | 0,99 | 0,97 | 0,84 | 0,85 | 0,95 |
| [2]GDE (%) | 27,0 | 13,0 | 12,0 | 50,0 | 16,6 | 29,1 |
| [3]VC% | 0,88 | 0,72 | 0,73 | 0,60 | 0,75 | 0,91 |

$FCO_2$ = efluxo de $CO_2$, T solo = Temperatura do solo, U solo = Umidade do solo, [1]$R^2$= coeficiente de determinação, [2]GDE%=grau de dependência espacial e; [3]VC=validação cruzada.

Tabela 3. Modelos e parâmetros estimados aos semivariogramas do efluxo de $CO_2$ (**$\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$**), temperatura (°C) e umidade do solo (%) em Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau e café no município de Apuí, AM.

Estudando a variabilidade espacial do $FCO_2$ durante 18 dias consecutivos, La Scala Júnior et al. (2000) encontraram, em sua maioria, modelos esféricos e exponenciais que explicaram a variabilidade espacial deste atributo. Segundo Aquino et al. (2015) os modelos esférico e exponencial são os que melhor descrevem a variabilidade espacial da Usolo do solo, concordando com os dados deste estudo. De igual modo, foram ajustados

modelos exponenciais e esféricos à Tsolo nas áreas de estudos, resultados que evidenciam constante variabilidade temporal dos parâmetros avaliados.

O alcance é uma medida importante no planejamento e na avaliação experimental, auxiliando na definição de procedimento de amostragem (Oliveira et al. 2015). Os menores valores de alcances foram observados para a Tsolo na área de café e cacau com intervalo de 18,82 e 25 m, respectivamente, indicando assim que esta variável apresenta distribuição dos valores de dependência espacial menos prolongada ao longo da área de estudo (Tabelas 3). Por outro lado, o maior valor de alcance foi verificado para o $FCO_2$ na área de cacau e café entre 40 e 33,9 m. Os índices de alcance de dependência espacial para as variáveis analisadas variaram de 15 m a 47 m estes valores podem ser atribuídos às constantes variações nas formas do relevo das áreas dos campos naturais de acordo com Campos et al. (2012b), com mudanças repentinas de formas côncavas e convexas ao longo da paisagem.

Todas as modelagens realizadas apresentaram um valor de $R^2$ superior a 0,80 e validação cruzada com valores mínimo de 0,60 e máximo 0,91 (Tabela 3) semelhante aos encontrados por Aquino et al. (2015) em estudos de atributos do solo na Amazônia. Por outro lado, as variáveis analisadas apresentaram comportamento de dependência espacial (GDE) entre forte e moderado (Tabela 3). Assim, sobre esta perspectiva, pode-se afirmar que a distância adotada da separação das amostras contribuiu para os baixos percentuais de GDE das áreas de cacau e café. A forte dependência espacial dos atributos relacionados aos $FCO_2$, são atribuídas aos fatores intrínsecos, tais como o clima, tipo de solo e aos processos físicos e químicos e a atividade biológica (Cambardella et al. 1994).

Os mapas de krigagem dos parâmetros $FCO_2$ e Tsolo mostram significativa correlação de distribuição espacial desses atributos para os sistemas de sob cultivo de cacau e café (Figura 2 e 3; Tabela 4), haja vista que há influência da temperatura e umidade sobre a atividade microbiológica do solo, a qual resulta em $FCO_2$ do solo, conforme citam Brito et al. (2010) e Schwendenmann et al. (2003).

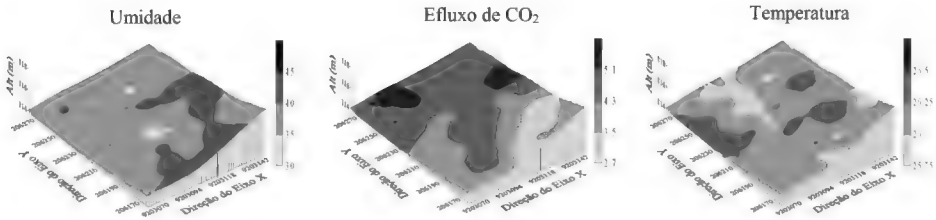



Figura 2. Mapas de krigagem da umidade (%), efluxo de $CO_2$, (**µmol m$^{-2}$s$^{-1}$**) temperatura (°C) do solo em Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

Todavia no mapa da umidade do solo na área de TPA com cacau (Figura 2) a região que concentra umidade na faixa de 45 a 50% vê-se no mapa do efluxo de $CO_2$

menor emissão desse gás. Concordando com os resultados O que parece contraditório ao enunciado por Brito et al. (2010) e Schwendenmann et al. (2003) pode ser dado ao fato das intensas chuvas que ocorreram anteriormente às leituras, resultando na ocupação, por umidade, dos espaços porosos do solo as expensas da eliminação dos gases do solo imediatamente às chuvas. Este fenômeno é, também, observado na área TPA com café (Figura 3), contudo, no intervalo de umidade restrito a 23 e 39%.

O efluxo de $CO_2$ do solo apresentou-se correlacionados como a Usolo e Tsolo, utilizando-se o coeficiente de correlação simples ($p < 0,01$) (Tabela 4). Houve correlação positiva entre o $FCO_2$ com a Tsolo, por outro lado, houve correlação negativa do $FCO_2$ correlacionou-se negativamente com a Usolo, evidenciando a influência destes dois fatores nos fluxos de $CO_2$ (Simoes et al. 2010).

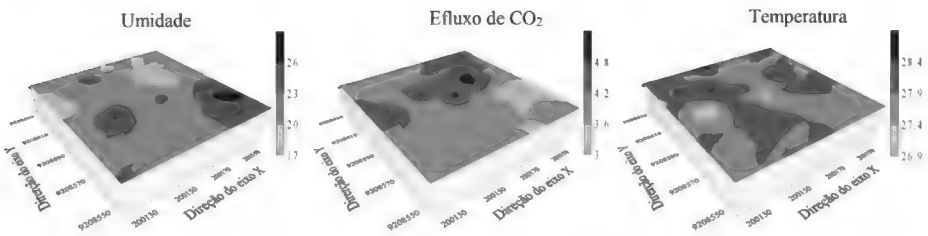



Figura 3. Mapas de krigagem da umidade (%), efluxo de $CO_2$, (**µmol m$^{-2}$s$^{-1}$**) e temperatura (°C) do solo em Terra Preta Arqueológica sob cultivo de café no município de Apuí, AM.

| | TPA com cacau | | | TPA com cacau | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $FCO_2$ | Usolo | Tsolo | $FCO_2$ | Usolo | Tsolo |
| FCO2 | 1,00 | -0,54* | 0,77* | 1,00 | -0,51* | 0,69* |
| Usolo | | 1,00 | 0,66* | | 1,00 | 0,63* |
| Tsolo | | | 1,00 | | | 1,00 |

*Correlação Pearson; significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; $FCO_2$=efluxo de $CO_2$; Usolo = Umidade do solo; Tsolo = temperatura do solo.

Tabela 4. Coeficientes de correlação entre o efluxo de $CO_2$, umidade do solo e temperatura do solo (n = 176), em Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau e café no município de Apuí, AM.

Vale ressaltar que a correlação dos parâmetros efluxo de $CO_2$, temperatura e umidade pode ter sido afetada pela variabilidade temporal, uma vez que a mensuração desses parâmetros foi realizada em quatro dias consecutivos, obtendo-se ao final um valor médio representando cada ponto amostral da malha, justificando os resultados expressos pelos mapas de krigagem.

## 4 I CONCLUSÕES

Os parâmetros efluxo de $CO_2$, temperatura e umidade apresentaram estrutura de

dependência espacial.

O efluxo de $CO_2$ do solo na área de TPA com cacau foi em média superior ao da área de TPA com café, mostrando haver diferentes taxas de efluxo de $CO_2$ entre classes de solos com horizonte A antrópico.

Na área TPA com cacau o efluxo de $CO_2$ apresentou correlação inversamente proporcional com a umidade do solo, atribuído à saturação por umidade as expensas da expulsão dos gases do solo imediatamente após as chuvas.

## REFERÊNCIAS


ADACHI, M. Spatial and temporal variation in soil respiration in a seasonally dry tropical forest, Thailand. **Journal of Tropical Ecology**, Amsterdam, v.1, p.531-539. 2009.

AQUINO, R. E et al. Use of scaled semivariograms in the planning sample of soil physical properties in southern Amazonas, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n.1, p. 21-30, 2015.

AQUINO, R. E. et al. Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in Archeological Dark Earth in Apuí region, southern Amazonas. **Geoderma**, Amsterdan, v. 262, n.1, p. 35-44, 2016.

BRITO, L. F. et al. Spatial variability of soil $CO_2$ emission in different topographic positions. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n.4, p. 19-27, 2010.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society American Journal**, Madson, v. 58, n.1, p.1501-1511, 1994.

CAMPOS, M. C. C. et al. Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, Campinas, v.70, n.3, p.598-609, 2011.

CAMPOS, M. C. C. et al. Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. **Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v.6, n.4, p.102-109, 2012a.

CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; SANTOS, L. A. C.; AQUINO, R. E.; SOARES, M. D. R.. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e umidade em áreas cultivadas com mandioca na região de Humaitá, AM. **Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v.6, p.09-16. 2012b.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: SPI/Embrapa Produção de Informação, p. 353, 2013.

GLASER, B. **Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the brazilian amazon region**. Organic Geochemistry, Amsterdam, v.31, n.4, p.669-678, 2001.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate change 2007**. Fourth Assessment Report on climate change impacts, adaptation and vulnerability of the Intergovernamental Panel on Climate Change. Cambridge, Cambridge University, p.939, 2007.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistcs**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

KÄMPF, N.; KERN, D.C. **O solo como registro da ocupação humana pré-histórica na Amazônia**. In: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L.R.F.; COOPER, M.; SILVA, A.P.; CARDOSO, E.J. (Org.). Tópicos em Ciência do solo. 1 ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005, 5: 277-320.

LA SCALA JÚNIOR, N. et al. A review on soil carbon accumulation due to the management change of major Brazilian agricultural activities. **Brazilian Journal Biology,** Sao Paulo, v. 72, n. 3, p. 775–875, 2012.

LA SCALA JÚNIOR, N. et al. Fractal dimension and anisotropy of soil $CO_2$ emission in an agricultural field during fallow. **International Agrophysics**, Amsterdam, v. 23, n. 3 p. 353-358, 2009.

LA SCALA JÚNIOR, N. et al. Short-term temporal changes in the spatial variability model of $CO_2$ emissions from a Brazilian bare soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Exeter, v. 32, n. 4. p. 1459-1462, 2000.

MAIER, M. et al. Soil CO2 efflux vs. soil respiration: Implications for flux models. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 151, n. 12, p. 1723-1730, 2011.

MINITAB **Release 14.1**, Statistical Software. US/Canada. 2000.

OLIVEIRA, I. A. et al. Use of scaled semivariograms in the planning sample of soil chemical properties in southern Amazonas, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 1, p. 31-39, 2015.

PINTO-JUNIOR, O. B. et al. Efluxo de $CO_2$ do solo em floresta de transição Amazônia Cerrado e em área de pastagem. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 39, n. 4, p. 813-821. 2009.

ROBERTSON, G. P. *GS+* **Geostatistics for the environmental sciences**: GS+ user's guide. Plainwell: Gamma Design Software, 1998.152p.

SANTOS, L. A. C et al. Caracterização de terras pretas arqueológicas no Sul do Estado do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.4, p. 825-836, 2013.

SCHWENDENMANN, L. Spatial and temporal variation in soil $CO_2$ efflux in an old-growth neotropical rain forest, la selva, Costa Rica. **Biogeochemistry**, Amsterdam, v. 64, n. 1 p. 111-128, 2003.

SDS - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Relatório técnico síntese dos diagnósticos**: Área estadual sul de Apuí e Manicoré. Manaus, 2004. 20p.

SILVA NETO et al. Variação espacial do teor de matéria orgânica do solo e produção de gramínea em pastagens de capim-marandu. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.28, p.41-53, 2012.

SILVA, C. M. et al. Temporal variation of soil $CO_2$ efflux in oil palm-based agroforestry systems in eastern Amazon. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 46, n. 1, p.1-12. 2016.

SILVA, C.M. et al. Variação temporal do efluxo de $CO_2$ do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia Oriental. **Acta Amazonica,** Manaus, v.46, n.1, p.1-12, 2016.

SIMÕES, S.M.O.; ZILLI, J.E.; COSTA, M.C.G.; TONINI, H.; BALIEIROS, F.C. Carbono orgânico e biomassa microbiana do solo em plantios de Acacia mangium no Cerrado de Roraima. **Acta Amazonica**, v.40, p.23-30, 2010.

TEDESCHI, V. et al. Soil respiration in a Mediterranean oak forest at different developmental stages after. Science **Society America Journal**, Madison, v. 62, n. 33, p. 810-817, 2006.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. **Spatial variability of soil physical properties in the field**. In: Hillel, D. (Ed.) Applications of soil physics. New York: Academic Press, p. 385, 1980.

# CAPÍTULO 6

# VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM ÁREA DE TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA SOB PASTAGEM EM MANICORÉ, AM

*Data de aceite: 18/05/2021*

*Data de submissão: 11/05/2021*

**Marcelo Dayron Rodrigues Soares**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
https://orcid.org/0000-0003-2942-5320

**Milton César Costa Campos**
Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal da Paraíba
Areia - Paraíba
https://orcid.org/0000-0002-8183-7069

**Zigomar Menezes de Souza**
Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas
Campinas – São Paulo
https://orcid.org/0000-0001-9302-6725

**Wildson Benedito Mendes Brito**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
https://orcid.org/0000-0002-4267-5992

**José Maurício da Cunha**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://lattes.cnpq.br/3425545536495518

**RESUMO**: Na Região Amazônica, as áreas com Terras Pretas Arqueológicas (TPAs) são cada vez mais fragmentadas devido ao desmatamento e ao uso agropecuário, o que provoca modificações principalmente nos atributos físicos do solo. O objetivo foi verificar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de terra preta arqueológica sob pastagem na região de Manicoré, AM. Foi estabelecida uma malha amostral com dimensões de 80 × 56 m, com 88 pontos amostrais, em intervalos regulares de oito metros (8 m), nas profundidades 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30m. Foram realizadas análises granulométricas, macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), umidade do solo (Us), e a resistência do solo à penetração (RP). Os resultados foram submetidos à análise descritiva e geoestatística. O estudo das variáveis no espaço permitiu identificar a variabilidade existente na área em estudo e separar as zonas de manejo específico. Todos os atributos mostraram dependência espacial, com exceção para a RP e a Us que apresentaram aleatoriedade. Os valores acentuados de RP, Ds e Micro na profundidade 0,0-0,05 m indicaram um solo compactado em superfície.

**PALAVRAS-CHAVE**: Compactação, Dependência Espacial, Sul do Amazonas.

## SPATIAL VARIABILITY OF SOIL PHYSICAL ATTRIBUTES IN AREA OF DARK ARCHAEOLOGICAL EARTH IN MANICORE, AM

**ABSTRACT**: In the Amazon region, areas with Archaeological Black Earths (ABE's) are increasingly fragmented due to deforestation and agricultural use, which mainly changes the

soil physical properties. This study aimed to determine the spatial variability of soil physical properties in archaeological black earth area under pasture in Manicore Amazon region. A sampling mesh with dimensions of 80 × 56 m was established with 88 sampling points, at regular intervals of 08m at depths 0.00-0.05; 0.05-0.10; 0.10-0.20; 0.20-0.30m. Analyzes of texture, macroporosity (Macro) and microporosity (Micro), soil of density (Ds), total porosity (TP), soil moisture (Us), and soil penetration resistance (PR) were performed. The results were submitted to descriptive and geostatistics analysis. The analyses of the variables in space identified the variability in the field under study and separate the specific management zones. All attributes showed spatial dependence, except for RP and Us that had randomness. The marked values of RP, Ds and Micro depth 0.0-0.05 m indicated a compacted soil surface.
**KEYWORDS**: Soil compactation, Spacial dependence, South Amazon.

## 1 I INTRODUÇÃO

A região Amazônia é, com frequência, vista como um ambiente uniforme de alta pluviosidade e altas temperaturas, solos com acidez elevada e pobres em nutrientes. No entanto, dentre os diversos tipos de solo da Amazônia, destacam-se os com horizonte A antrópico (Au), de coloração escura, com presença de fragmentos cerâmicos, popularmente denominados "Terra Preta de Índio" (TPI) ou "Terra Preta Arqueológica" (TPA) (KÄMPF & KERN, 2005).

Em pesquisa com caracterização e classificação de TPA's Campos et al. (2011) encontraram teores altos e muito altos de P disponível em horizontes antrópicos, afirmando que, esses ambientes são caracterizados por elevados teores de $Ca^{2+}$, $K^{+}$ e $Mg^{2+}$. Quanto aos atributos físicos, as TPA's apresentam solos com horizontes bem drenados com boa disponibilidade de água, baixos valores de densidade do solo, boas condições de aeração e porosidade. Quando comparado com solos sob diferentes usos, Oliveira et al. (2015), destacam que a TPA com sua alta fertilidade natural, diferiu dos demais usos (mandioca, pastagem e cana-de-açúcar). Em função das características adequadas para o cultivo, as TPA's são bastante exploradas na Amazônia, entretanto, grandes áreas nativas de TPA's estão sendo convertidas em pastagem, levando a degradação do solo.

Estudos recentes com variabilidade espacial têm sido utilizados com grande êxito em diversos cenários Amazônicos, dentre os quais, destacam-se: estabilidade de agregados e estoque de carbono em campo natural e floresta (ALHO et al., 2014); atributos físicos em área de agrofloresta (CAMPOS et al., 2013); atributos físicos em área de pastagem/floresta (AQUINO et al., 2014).

As informações a respeito dos atributos físicos do solo e da variabilidade espacial das TPAs na região Amazônica, ainda são pouco difundidas e escassas, sendo necessário o avanço de pesquisas que demonstrem a qualidade física do solo, atuando principalmente na sustentabilidade desses ambientes. Neste contexto, Aquino et al. (2014) com o intuito de subsidiar pesquisas futuras utilizando técnicas geoestatísticas nos atributos físicos do solo em áreas antropogênicas e não antropogênicas, verificaram que esta ferramenta

apresentou ótimos resultados, e a maior continuidade espacial foi em área antropogênica.

Dessa maneira, o objetivo foi verificar a variabilidade espacial dos atributos do solo em área de terra preta arqueológica sob pastagem na região de Manicoré, AM.

## 2 I MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo localiza-se no sul do Estado do Amazonas, nas mediações da comunidade de Santo Antônio do Matupi, às margens da BR 230, transamazônica, região de Manicoré, AM. As coordenadas geográficas são 07° 53' 36 84" de latitude Sul e 61° 23'54,49" de longitude Oeste e com altitude média de 83 m.

O material de origem é proveniente da Formação Içá, caracterizada com produto de sedimentação pleistocênica, coberta por depósitos eólicos (Cprm, 2005). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical chuvoso, apresentando um período seco de pequena duração (Am), temperaturas variando entre 25 e 27 °C e precipitação média anual de 2.500 mm, e chuvas concentrada de outubro a junho, (Brasil, 1978).

O relevo é constituído por platôs com superfícies planas, sendo a zona de borda marcada por colinas e cristas alinhadas e localmente escarpadas, enquanto as áreas planas têm como principal característica a presença de uma superfície pediplanada. A pastagem foi implantada há sete anos de uso com pastejo extensivo, e está sob o cultivo de *Urochloa brizantha*. O solo da foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo.

O solo foi amostrado nas profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, nos pontos de cruzamento de uma malha, com intervalos regulares de 8 m, com dimensão 80 x 56 m, totalizando 88 pontos amostrais. Esses pontos foram georreferenciados com equipamento de GPS, para construção do modelo digital de elevação (MDE).

A análise granulométrica das partículas sólidas do solo foi realizada pelo método da pipeta, utilizando solução de NaOH 0,1 N como dispersante químico e agitação mecânica em Milk-shake de alta rotação por 10 min. A fração argila foi separada por sedimentação, a areia, por tamisação e o silte, calculado por diferença (EMBRAPA, 2011).

As amostras de solo foram coletadas em estrutura preservada, realizadas por meio de anel volumétrico com 5 cm de altura e 4,5 cm de diâmetro. Em seguida, foram saturadas por meio de elevação gradual de uma lâmina de água até atingir cerca de 2/3 da altura do anel, para que esse sofresse saturação (EMBRAPA, 2011). A porosidade total (Pt) foi obtida pela diferença entre a massa do solo saturado e a massa do solo seco, em estufa a 105 ºC , durante 24 h, sendo a massa de água usada para saturação dos anéis convertida em volume. A microporosidade do solo foi determinada pelo método da mesa de sucção. Pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade, obteve-se a macroporosidade. A densidade do solo (Ds) foi calculada pela relação entre a massa de solo seca a 105 °C, durante 24 h, da amostra de solo do cilindro volumétrico e o volume do mesmo cilindro (Embrapa, 2011).

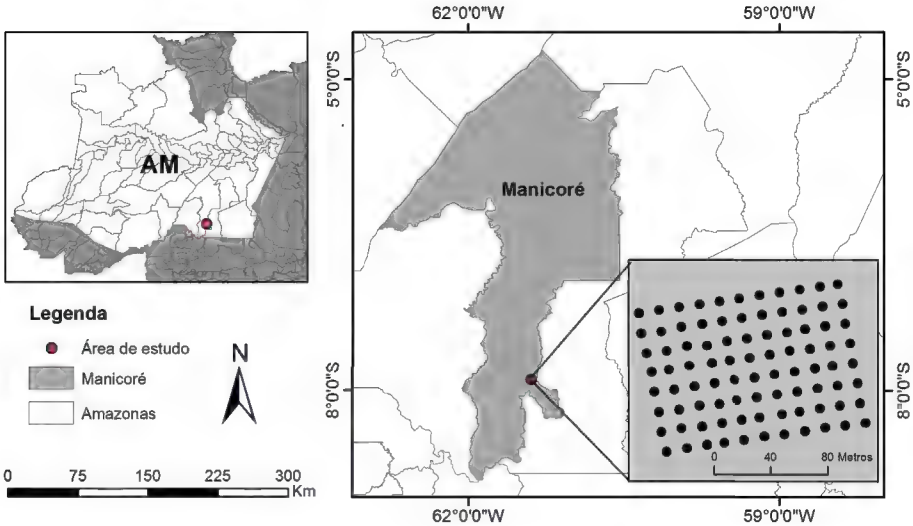



Figura 1. Localização da área de estudo.

A umidade gravimétrica no solo foi determinada com amostras deformadas, conforme o proposto em Embrapa (2011). Na determinação da resistência do solo à penetração, amostras indeformadas de solo em anéis foram coletadas e as medidas tomadas por meio de um penetrômetro eletrônico estático de laboratório (MA933, Marconi, Piracicaba, SP, Brasil) com velocidade constante de penetração de 0,01 m $min^{-1}$, registro de uma leitura por segundo, cone com semiângulo de 30° e área de 3,14 $cm^2$, equipado com atuador linear e célula de carga de 20 kgf acoplada a um microcomputador para aquisição dos dados, conforme descrito por Tormena et al. (1998).

A variabilidade do solo foi avaliada pela análise exploratória dos dados, calculando-se a média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria, coeficiente de curtose e teste de normalidade. A hipótese de normalidade dos dados foi testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, no software estatístico Minitab 14 (Minitab, 2000).

Para a caracterização da variabilidade espacial, utilizou-se a análise geoestatística (VIEIRA et al., 1983). Sob teoria da hipótese intrínseca o semivariograma experimental foi estimado por:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \qquad (1)$$

onde: γ(h) - valor da semivariância para uma distância h; N(h) - número de pares envolvidos no cálculo da semivariância; $Z(x_i)$ - valor do atributo Z na posição $x_i$; $Z(x_i+h)$ - valor do atributo Z separado por uma distância h da posição $x_i$. Do ajuste de um modelo

matemático aos valores calculados de (ŷ) h são estimados os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma (o efeito pepita, $C_0$; patamar, $C_0+C_1$; e o alcance, a).

Para analisar o grau da dependência espacial dos atributos em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), em que são considerados de dependência espacial forte os semivariogramas que têm um efeito pepita menor ou igual a 25% do patamar, moderada quando está entre 25 e 75% e fraca quando for maior que 75%.

Os semivariogramas experimentais foram escolhidos com base no número de pares envolvidos no cálculo da semivariância, presença de patamar claramente definido melhor coeficiente do teste de validação cruzada (VC) "cross-validation" e maior coeficiente de determinação ($R^2$), os quais variam de 0 a 1, sendo os mais próximos de 1 aqueles que caracterizam o modelo como mais eficiente para expressar o fenômeno estudado. Após o ajuste dos modelos matemáticos permissíveis, foi feita a interpolação dos dados, por meio da krigagem. A análise geoestatística foi realizada no *software* GS+.

## 3 I RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fração areia foi dominante em todas as profundidades (Tabela 1). Fato este, justificável pela natureza grosseira do material de origem oriundos dos arenitos da Formação Içá. Campos et al. (2011) caracterizando terras pretas arqueológicas na região de Manicoré, AM, observou-se que a fração areia foi dominante em todos os perfis analisados. Neste mesmo segmento, Santos et al. (2013), em estudo com caracterização de terras pretas arqueológicas na região Sul do Amazonas, verificou que em um dos sete perfis analisados, houve a predominância da fração areia.

Os valores de média e da mediana para todas as variáveis foram similares, tendendo a uma distribuição simétrica. Os valores próximos de média e mediana, atendem às condições de normalidade, ou seja, os valores não são dominados por valores atípicos de distribuição e são adequados para uso da geoestatística. Os coeficientes de assimetria e curtose próximos a zero, reforçam a proximidade à simetria na distribuição dos dados. Os resultados do teste de Komogorov-Smirnov (KS), dos atributos, apenas o silte, argila na profundidade 0,0-05 m, areia na profundidade 0,05-0,10 m e argila na profundidade (0,20-0,30 m) não apresentaram normalidade.

| Estatística | Areia | Silte | Argila | Areia | Silte | Argila |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | g kg$^{-1}$ | | | | | |
| | 0,00-0,05 m | | | 0,05-0,10 m | | |
| Média | 711,13 | 235,49 | 51,18 | 706,28 | 222,95 | 71,59 |
| Mediana | 711,77 | 234,64 | 50,18 | 711,94 | 220,94 | 71,80 |
| [2]CV (%) | 4,30 | 13,29 | 29,53 | 4,68 | 15,30 | 28,58 |
| Assimetria | -0,20 | 0,43 | 0,57 | -0,93 | 0,51 | 0,48 |
| Curtose | -0,63 | 0,90 | -0,20 | 1,11 | 0,54 | -0,14 |
| [3]d | 0,15* | 0,01ns | 0,01ns | 0,01ns | 0,15* | 0,15* |
| | 0,10-0,20 m | | | 0,20-0,30 m | | |
| Média | 713,76 | 205,94 | 73,91 | 748,59 | 185,53 | 64,02 |
| Mediana | 715,77 | 206,21 | 73,20 | 747,81 | 185,04 | 61,56 |
| [2]CV% | 4,43 | 16,77 | 33,37 | 3,90 | 19,85 | 29,25 |
| Assimetria | -0,48 | -0,41 | 0,28 | -0,11 | 0,02 | 0,50 |
| Curtose | 0,40 | 0,23 | -0,11 | -0,83 | -0,57 | -0,74 |
| [3]d | 0,15* | 0,15* | 0,15* | 0,15* | 0,15* | 0,01ns |

DP[1]= desvio padrão; CV[2]= coeficiente de variação; d[3] = *significativo a 5% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov.

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos do solo em diferentes profundidades em área de terra preta arqueológica sob pastagem, na região de Manicoré-AM

Os atributos texturais apresentaram baixa e média variabilidade, com destaque para areia que apresentou o menor valor 3 %, o silte e argila apresentaram os maiores valores, 19,0 e 33,0% respectivamente. Adotando-se os critérios propostos por Warrick & Nielsen (1980), a variável areia para ambas as profundidades, apresentou um CV, abaixo de 12 %, demonstrando menor heterogeneidade desse atributo para a área de estudo; as demais variáveis silte e argila apresentaram um CV entre 12-16 %, Vale ressaltar que as frações texturais são estáveis, ou seja, se modificam pouco ao longo do tempo, apresentando baixo coeficiente de variação.

A análise geoestatística, realizada por meio dos semivariogramas, evidenciou que todas as frações texturais apresentaram dependência espacial, logo, a distribuição no espaço desses atributos não é aleatória (Tabela 2). O alcance da autocorrelação espacial, ou seja, a distância máxima à qual os atributos estão espacialmente correlacionados (VIEIRA et al., 1983), apresentaram valores maiores que a grade amostral (8 x 8 m), o que evidencia a adequação do espaçamento de amostragem, na caracterização da dependência espacial da área.

Observa-se que os atributos que apresentaram menor e maior alcance foram o teor de areia na profundidade 0,05-0,10 m e o silte na profundidade 0,10-0,20 m respectivamente. De modo geral, os maiores alcances para as frações texturais foram observados na profundidade superficial 0,00-0,05 m, quando comparado com a profundidade 0,20-0,30 m.

O ajuste dos modelos matemáticos que melhor ilustrasse o comportamento espacial da variável em função da distância foram o esférico e o exponencial. Nos trabalhos de variabilidade espacial de características do solo é comum se encontrar ajuste dos semivariogramas a esses dois modelos. Os valores das validações cruzadas representantes dos semivariogramas ajustados tiveram um desempenho próximo ao ideal, uma vez que variaram de 0,87 para o silte na profundidade de 0,05-0,10 m e 1,00 para a argila na profundidade 0,05-0,10 m. Segundo a classificação proposta por Cambardella et al. (1994), as frações areia e silte na profundidade 0,05-0,10 m e areia, silte e argila na profundidade 0,20,-30 m apresentaram forte dependência espacial [$C_0/(C_0+C_1)$ 25 %], e as demais frações, em todas as profundidades apresentaram moderada dependência espacial [$(C_0/(C_0+C_1)$ entre 25 e 75 %].

| Parâmetros | Silte | Argila | Areia | Silte | Argila | Areia |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,00-0,05 m | | | 0,05-0,10 m | | |
| Modelo | Esf | Exp | Esf | Exp. | Esf | Esf |
| [1]($C_0$) | 760 | 143,58 | 737 | 144 | 155 | 30 |
| [2]($C_0+C_1$) | 1389,87 | 268,24 | 1356,44 | 1309 | 512,7 | 1099 |
| [3]a (m) | 57,29 | 42,90 | 42,12 | 16,20 | 67,37 | 13,20 |
| [4]$R^2$ | 0,80 | 0,75 | 0,86 | 0,88 | 0,98 | 0,79 |
| [5]GDE (%) | 55 | 53 | 54 | 11 | 32 | 3 |
| [6]VC% | 0,98 | 0,91 | 0,95 | 0,87 | 1,00 | 0,96 |
| | 0,10-0,20 m | | | 0,20-0,30 m | | |
| Modelo | Esf | Esf | Esf | Esf | Exp | Exp |
| [1]($C_0$) | 605 | 363 | 499 | 51 | 44,4 | 146 |
| [2]($C_0+C_1$) | 1497 | 726,1 | 1209 | 1362 | 351,91 | 1159 |
| [3]a (m) | 76,31 | 59,90 | 69,50 | 15,40 | 20,70 | 20,10 |
| [4]$R^2$ | 0,98 | 0,94 | 0,96 | 0,64 | 0,91 | 0,72 |
| [5]GDE (%) | 40 | 50 | 41 | 4 | 13 | 13 |
| [6]VC% | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,95 | 0,84 |

Esf.: Esferico; Exp.: Exponencial; [1] $C_0$: efeito pepita; $C_0+C_1$ : patamar; a: alcance (m); $R^2$: coeficiente de determinação; GDE%: grau de dependência espacial ; VC: validação cruzada.

Tabela 2. Modelos e parâmetros geoestatísticos dos atributos do solo, nas diferentes profundidades em terra preta arqueológica sob pastagem na região de Manicoré-AM.

Os valores dos atributos em estudo foram de média e mediana semelhança, mostrando distribuição simétrica; os dados apresentam ou se aproximam da distribuição normal. Outro indicativo da normalidade são os valores de coeficiente de assimetria próximos de zero.

Considerando o valor limite de RP de 2,0 MPa, conforme Tavares Filho & Tessier (2009), verificou-se nas profundidades em estudo, apenas a superficial, apresentou

RP, acima deste. Valores acima de 2,0 MPa podem representar nível de compactação significativo, o que pode restringir o crescimento radicular das plantas. Os valores obtidos foram 2,10, 1,37, 0,78 e 0,57 (Tabela 3), para as respectivas profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 m. Em áreas de pastagens, o dimensionamento inadequado de animais na ocupação da pastagem, modifica os atributos físicos do solo, da mesma forma que, Pires et al. (2012), afirmam que a pressão exercida pelo casco dos bovinos por meio do pisoteio animal, na camada superficial do solo, pode resultar em alteração da estrutura, selamento superficial e compactação.

A redução do conteúdo de água no solo promove o aumento da coesão entre as partículas minerais, tornando-as mais difíceis de ser separadas por forças externas, o que resulta no aumento da RP Silveira et al. (2010); observa-se que na profundidade 0,00-0,05 m, um fator que possivelmente contribui para obtenção de valores mais elevados de RP, foi a menor umidade do solo (0,33 $m^3 m^{-3}$), quando comparado com as profundidades mais profundas (0,35 $m^3m^{-3}$ para 0,10-0,20 m e 0,37 $m^3m^{-3}$ para 0,20-0,30 m).

| Estatística | RP | Ds | Us | Macro | Micro | PT |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | MPa | Mg $m^{-3}$ | ----------$m^3m^{-3}$ ---------- | | | |
| | | | 0,0-0,05 m | | | |
| Média | 2,10 | 1,29 | 0,33 | 0,11 | 0,27 | 0,39 |
| Mediana | 2,08 | 1,30 | 0,33 | 0,11 | 0,27 | 0,39 |
| ²CV% | 26,29 | 9,03 | 16,67 | 26,38 | 11,27 | 8,72 |
| Assimetria | 0,17 | -0,39 | 0,21 | 0,76 | -0,14 | -0,41 |
| Curtose | -0,30 | -0,01 | 0,20 | 0,62 | 3,74 | 1,74 |
| ³d | 0,10* | 0,15* | 0,15* | 0,10* | 0,07* | 0,08* |
| | | | 0,05-0,10 m | | | |
| Média | 1,37 | 1,25 | 0,33 | 0,16 | 0,26 | 0,43 |
| Mediana | 1,38 | 1,25 | 0,34 | 0,16 | 0,26 | 0,42 |
| ²CV% | 40,09 | 7,61 | 11,71 | 23,83 | 6,91 | 9,09 |
| Assimetria | 0,98 | -0,24 | 0,61 | 0,03 | 0,70 | 0,58 |
| Curtose | 3,16 | -0,85 | -0,13 | 0,32 | 0,33 | 0,79 |
| ³d | 0,14* | 0,03ns | 0,10* | 0,15* | 0,15* | 0,01ns |
| | | | 0,10-0,20 m | | | |
| Média | 0,78 | 1,17 | 0,35 | 0,20 | 0,26 | 0,46 |
| Mediana | 0,75 | 1,16 | 0,35 | 0,20 | 0,26 | 0,46 |
| ²CV% | 33,82 | 9,29 | 19,03 | 21,19 | 14,27 | 9,06 |
| Assimetria | 0,97 | 0,30 | 0,17 | -0,28 | 0,08 | 0,43 |
| Curtose | 1,65 | 0,16 | 0,86 | 0,31 | 2,26 | 0,04 |
| ³d | 0,02ns | 0,15* | 0,148 | 0,15* | 0,01ns | 0,15* |
| | | | 0,20-0,30 m | | | |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Média | 0,57 | 1,16 | 0,37 | 0,18 | 0,27 | 0,46 |
| Mediana | 0,51 | 1,16 | 0,38 | 0,17 | 0,28 | 0,46 |
| [2]CV% | 38,07 | 7,84 | 18,75 | 28,10 | 16,15 | 7,00 |
| Assimetria | 0,97 | -0,17 | 0,09 | 0,49 | -0,48 | 0,30 |
| Curtose | 1,65 | -0,20 | 1,16 | -0,29 | 0,64 | 0,30 |
| [3]d | 0,01ns | 0,15* | 0,15* | 0,01ns | 0,01ns | 0,15* |

RP: resistência do solo à penetração; Ds: densidade do solo; Us: umidade do solo; Macro: macroporosidade; Micro: microporosidade; PT: porosidade total. DP[1]: desvio padrão; CV[2]: coeficiente de variação; d[3]: *significativo a 5% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov.

Tabela 3. Estatística descritiva dos atributos físicos do solo em diferentes profundidades em uma área de terra preta arqueológica sob pastagem na região de Manicoré, AM.

O maior valor de Ds foi para profundidade 0,0-0,05 m de 1,26 Mg $m^{-3}$ e menor 1,16 Mg $m^{-3}$ para profundidade 0,20-0,30 m. De maneira geral, os valores de Ds foram considerados baixos, uma vez que estes resultados são características de ambientes com TPA. Este comportamento é resultante dos elevados teores de carbono orgânico e de intensa atividade biológica (fauna e raízes). Resultados semelhantes relatou Barros et al. (2012), em estudos com caracterização física de terra preta de índio no Estado do Pará.

Para macro foram observados valores superiores a 0,10 $m^3$ $m^{-3}$, com valores entre 0,11 $m^3$ $m^{-3}$ e 0,20 $m^3$ $m^{-3}$ nas profundidades amostradas (Tabela 3), segundo Kiehl (1979) a maioria das plantas desenvolve satisfatoriamente seu sistema radicular quando o volume de macroporos está acima de 0,10 $m^3m^{-3}$. Esse valor é considerado limite para a adequação difusão de oxigênio, demonstrando que se garante, então, uma boa aeração para o desenvolvimento do sistema radicular e às atividades dos microorganismos. Por outro lado, conforme Megda et al. (2008), o crescimento das raízes pode ser prejudicado quando a macroporosidade do solo é reduzida a valor inferior a 0,15 $m^3m^{-3}$. O valor obtido de 0,11 $m^3m^{-3}$ na camada superficial, provavelmente deve-se ao manejo do solo, e ao pisoteio do animal.

Conforme o limite proposto por Brady & Weil (2008) um solo ideal deve ter os valores de PT acima de 0,50 $m^3$ $m^{-3}$, considerado satisfatório para o crescimento adequado das plantas. Campos et al. (2011), observou a elevada porosidade total em estudos com classificação de terras pretas arqueológicas, fato justificável devido aos elevados teores de matéria orgânica e à intensa atividade biológica (fauna e raízes).

Pelos valores de coeficiente de variação, verificou-se que a Ds e PT apresentaram CV de caráter baixo (CV < 12%). Grego et al. (2012), analisando a variabilidade espacial dos atributos do solo em ambiente de pastagem, obervaram baixo CV para a Ds, e médio CV para a RP.

Para análise de estrutura da dependência espacial, a qual só é possível por meio da geoestatística, em especial do semivariograma, todos os atributos apresentaram dependência espacial, exceto para RP na profundidade 0,05-0,10 e Umidade na

profundidade 0,20-0,30 m, sendo considerados como efeito pepita puro, indicando que para essas variáveis a distância de amostragem não foi capaz de exibir toda a variância dos dados e, provavelmente existe tendência nos dados em seguir determinada direção.

Com base nos valores do grau de dependência espacial sugeridos por Cambardella et al. (1994), verificou-se que há forte dependência espacial para a Ds em todas as profundidades, enquanto os demais atributos apresentaram moderada e forte dependência espacial.

| Parâmetros | RP | Ds | Us (vol) | Macro | Micro | PT |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 0,0-0,05 m | | | |
| Modelo | Exp | Exp | Esf | Esf | Esf | Esf |
| [1]($C_0$) | 0,03 | 0,0014 | 0,89 | 5,37 | 0,27 | 0,38 |
| [2]($C_0$+$C_1$) | 0,27 | 0,0117 | 25,56 | 9,24 | 6,77 | 9,14 |
| [3]a (m) | 20,40 | 25,20 | 15,30 | 37,60 | 15,20 | 13,30 |
| [4]$R^2$ | 0,94 | 0,91 | 0,83 | 0,83 | 0,70 | 0,82 |
| [5]GDE (%) | 11 | 1 | 3 | 58 | 4 | 4 |
| [6]VC | 0,80 | 0,98 | 0,95 | 0,93 | 0,99 | 0,90 |
| | | | 0,05-0,10 m | | | |
| Modelo | - | Exp | Exp | Esf | Exp | Exp |
| [1]($C_0$) | - | 0,0010 | 1,93 | 5,69 | 0,80 | 1,13 |
| [2]($C_0$+$C_1$) | - | 0,0086 | 14,52 | 14,97 | 3,00 | 10,76 |
| [3]a (m) | - | 24,90 | 33,90 | 33,10 | 37,50 | 20,70 |
| [4]$R^2$ | - | 0,94 | 0,92 | 0,87 | 0,92 | 0,85 |
| [5]GDE (%) | - | 11 | 13 | 38 | 26 | 10 |
| [6]VC | - | 0,96 | 0,98 | 0,99 | 0,91 | 0,92 |
| | | | 0,10-0,20 m | | | |
| Modelo | Exp | Exp | Esf | Exp | Esf | Exp |
| [1]($C_0$) | 0,04 | 0,0012 | 19,57 | 2,01 | 5,39 | 1,85 |
| [2]($C_0$+$C_1$) | 0,07 | 0,010 | 40,16 | 14,41 | 12,01 | 15,18 |
| [3]a (m) | 71,13 | 21,90 | 52,90 | 27,60 | 68,81 | 21,00 |
| [4]$R^2$ | 0,74 | 0,82 | 0,92 | 0,73 | 0,96 | 0,82 |
| [5]GDE (%) | 57 | 12 | 48 | 14 | 45 | 12 |
| [6]VC | 0,73 | 0,99 | 0,96 | 0,97 | 0,93 | 0,83 |
| | | | 0,20-0,30 m | | | |
| Modelo | Esf | Exp | - | Exp | Esf | Exp |
| [1]($C_0$) | 0,02 | 0,0008 | - | 2,72 | 8,66 | 1,22 |
| [2]($C_0$+$C_1$) | 0,04 | 0,008 | - | 23,75 | 17,33 | 8,96 |
| [3]a (m) | 50,90 | 20,70 | - | 18,30 | 50,00 | 22,50 |
| [4]$R^2$ | 0,92 | 0,87 | - | 0,89 | 0,92 | 0,82 |
| [5]GDE (%) | 50 | 10 | - | 11 | 50 | 13 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| [6]VC | 0,74 | 0,89 | - | 0,93 | 0,91 | 0,86 |

Esf.: esférico; Exp.: exponencial; [1]$C_0$: efeito pepita; [2]$C_0$+$C_1$: patamar; [3]a: alcance (m); [4]$R^2$: coeficiente de determinação; [5]GDE%: grau de dependência espacial; [6]VC: validação cruzada.

Tabela 4. Modelos e parâmetros estimados aos semivariogramas dos atributos físicos do solo em diferentes profundidades em uma área de terra preta arqueológica sob pastagem na região de Manicoré, AM.

O alcance indica o limite da dependência espacial da variável, isto é, determinações realizadas a distâncias maiores que o alcance, tem distribuição espacial aleatória. Neste sentindo, os maiores valores da continuidade espacial foram para RP e Micro na profundidade 0,10-0,20 m, respectivamente com valores de 71,13 e 68,81 m; porém os demais atributos apresentaram alcance entre 13,30 e 52,90 m (Tabela 4). As variáveis físicas em estudo apresentaram alcances maiores que o estabelecido na malha amostral, podendo ressaltar que a continuidade espacial variou de variável para variável. Com relação aos valores do coeficiente de determinação ($R^2$) e validação cruzada (VC), apresentaram-se satisfatório, variando entre 0,70 a 0,96 para o ($R^2$), e 0,73 a 0,99 para (VC).

## 4 I CONCLUSÕES

O estudo da variabilidade espacial permitiu identificar as zonas de manejo especifico no terreno. Todos os atributos mostraram dependência espacial, com exceção para a RP na profundidade 0,05-0,10 m e Us na profundidade de 0,20-0,30 m apresentaram efeito pepita puro. Os valores acentuados de RP, Ds e Micro na profundidade 0,0-0,05m do solo, indicaram um solo compactado em superfície, no entanto, com o acréscimo da profundidade, há o aumento da Macro e Porosidade Total.

## REFERÊNCIAS


ALHO, L. C., CAMPOS, M. C. C., SILVA, D. M. P., MANTOVANELLI, B. C., SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial de estabilidade de agregados e estoque de carbono em Cambissolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Tropical,** v.44, n.3, p.246-254, 2014.

AQUINO, R. E., CAMPOS, M. C. C., MARQUES JÚNIOR, J., OLIVEIRA, I. A., MANTOVANELLI, B. C., SOARES, M. D. R. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em Latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira Ciência do Solo,** v.38, p.397-406, 2014.

AQUINO, R. E., CAMPOS, M. C. C., OLIVEIRA, I. A., MARQUES JUNIOR, J., SILVA, D. M. P. S., SILVA, D. A. P. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos antropogênico e não antropogênico na região de Manicoré, AM. **Bioscence Journal,** v.30, n.4, p. 988-997, 2014.

BARROS, K. R. M., LIMA, H. V., CANELLAS, L. P., KERN, D.C. Fracionamento químico da matéria orgânica e caracterização física de Terra Preta de Índio. **Revista Ciência Agrária,** v. 55, n. 1, p. 44-51, 2012.

BRADY, N. C., WEIL, R. R. **The Nature and Properties of Soils.** 14th ed. Pearson-Prentice Hall: Upper Saddle River, 2008. 990 p.

BRASIL. **Ministério das Minas e Energia.** Projeto Radambrasil, folha SB. 20, Purus. Rio de Janeiro, 1978. 561p.

CAMBARDELLA, C. A., MOORMAN, T.B., NOVAK, J.M., PARKIN, T.B., KARLEN, D.L., TURCO, R.F., KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of American Journal,** v. 58, p.1501-1511, 1994.

CAMPOS, M. C. C. RIBEIRO, M. R. SOUZA JÚNIOR, M. S., RIBEIRO FILHO, M. R., SOUZA, R. V. C. C., ALMEIDA, M. C. Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. **Bragantia,** v.70, n.3, p.598-609, 2011.

CAMPOS, M. C. C., SOARES, M. D. R., OLIVEIRA, I. A., SANTOS, L. A. C., AQUINO, R. E. . Spatial variability of physical attributes in Alfissol under agroforestry, Humaitá region, Amozonas state, Brazil. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 56, n.2, p. 149-159, 2013.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Base Cartográfica digital obtida pela CPRM,** a partir da base cartográfica integrada digital do Brasil ao milionésimo elaborada pelo IBGE. 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo.** Rio de Janeiro, 2011. 230p.

GREGO, C. R., RODRIGUES, C. A. G., NOGUEIRA, S. F., GIMENES, F. M. A., OLIVEIRA, A., ALMEIDA, C. G. F., FURTADO, A. L. S., DEMARCHI, J. J. A. Variabilidade espacial do solo e da biomassa epígea de pastagem, identificada por meio de geoestatística. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** v. 47, n.9, p. 1404-1412, 2012.

KÄMPF, N. & KERN, D. C. O solo como registro da ocupação humana pré-histórica na Amazônia. In: TORRADOVIDAL, P., ALLEONI, L. R. F., COOPER, M. & SILVA, A.P., **eds. Tópicos em ciência do solo.** Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. v.4, p.277-320.

KIEHL, E. J. Manual de edafologia: relação solo-planta. São Paulo: Ceres, 1979. 262p.

MEGDA, M. M., CARVALHO, M. P., VIEIRA, M. X., ANDREOTTI, M., PEREIRA, E. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de feijão e a porosidade de um Latossolo Vermelho de Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** v.32, p.781-788, 2008.

MINITAB Release 14.1, **Statistical Software**. 2000.

OLIVEIRA, I. A., CAMPOS, M. C. C., FREITAS, L., SOARES, M. D. R. Caracterização de solos sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Acta Amazônica**, v.45, n.1, p.1-12, 2015.

PIRES, B. S., DIAS JUNIOR, M. de S., ROCHA, W. W., ARAUJO JUNIOR, C. F., CARVALHO, R. de C. R. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-amarelo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** v.36, p.635-642, 2012.

ROBERTSON, G. P. **GS+ geostatistics for the environmental sciences:** GS+ user's guide. Plainwell: Gamma Design Software, 152p, 1998.

SANTOS, L. A. C., CAMPOS, M. C. C., AQUINO, R. E., BERGAMIN, A. C., SILVA, D. M. P., MARQUES JUNIOR, J., FRANÇA, A. B. C. Caracterização de terras pretas arqueológicas no Sul do Estado do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** v. 37, n. 4, p. 825-836, 2013.

SILVEIRA, D. C., MELO FILHO, J. F., SACRAMENTO, J. A. A. S., SILVEIRA, E. C. P. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no Recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 659-667, 2010.

TAVARES FILHO, J., TESSIER, D. Compressibility of oxisol aggregates under no-till in response to soil water potential. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1525-1533, 2009.

TORMENA, C. A., SILVA, A.P., LIBARDI, P. L. 1998. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** v. 22, p.573-581, 1998.

VIEIRA, S. R., HATFIELD, J. L., NIELSEN, D. R., BIGGAR, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. Berkeley: **University of California**, v.51, 1983. 75p.

WARRICK, A.W., NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. cap. 2, p.319-344.

# CAPÍTULO 7

# VARIABILIDADE ESPACIAL DO ESTOQUE DE CARBONO E ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA SOB PASTAGEM

*Data de aceite: 18/05/2021*
*Data de submissão: 11/05/2021*

**Bruno Campos Mantovanelli**
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria – Rio Grande do Sul
https://orcid.org/0000-0003-4291-1729

**Marcelo Dayron Rodrigues Soares**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
https://orcid.org/0000-0003-2942-5320

**Milton César Costa Campos**
Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal da Paraíba
Areia - Paraíba
https://orcid.org/0000-0002-8183-7069

**José Maurício da Cunha**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
https://orcid.org/0000-0003-4057-1708

**Zigomar Menezes de Souza**
Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas
Campinas – São Paulo
https://orcid.org/0000-0001-9302-6725

**Ivanildo Amorim de Oliveira**
Instituto Federal de Rondônia
Ariquemes – Rondônia
https://orcid.org/0000-0003-2299-3229

**Renato Eleotério de Aquino**
Instituto Federal de Rondônia
Colorado do Oeste – Rondônia
http://orcid.org/0000-0003-0267-6592

**RESUMO:** Algumas áreas de Terra Preta Arqueológica na Amazônia vêm sendo utilizadas com pastagem o que tem gerado grande preocupação quanto às alterações dos atributos físicos e o estado de agregação do solo. O objetivo deste estudo foi avaliar a variabilidade espacial e as possíveis modificações dos atributos físicos e agregados do solo em terra preta arqueológica sob pastagem. Uma grade de 80 x 56m foi usada e a amostragem realizada em 88 pontos em disposição de 8 x 8m. Nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20m foram avaliados: a densidade do solo (Ds), carbono orgânico total (COT), estoque de carbono (Est C), diâmetro médio ponderado (DMP), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e volume total de poros (VTP). Pelo exame de semivariogramas constatou-se a ocorrência de dependência espacial. Mesmo a área de estudo sendo em pastagem observou-se que os valores de Ds, Macro e VTP, estiveram acima ou abaixo dos valores de referências que podem causar restrição ao crescimento radicular de plantas e à infiltração de água no solo. O DMP e Ds foram dependentes do COT, pois os valores de ambos aumentam ou diminuem de acordo com a camada. Com o aumento da camada do solo, houve o acréscimo do estoque de carbono.

**PALAVRAS-CHAVE**: Estrutura do solo, Geoestatística, Manejo.

## SPATIAL VARIABILITY OF PHYSICAL ATTRIBUTES AND SOIL AGGREGATES IN ARCHAEOLOGICAL DARK DIRT UNDER PASTURE

**ABSTRACT:** Some areas of archaeological dark dirt in the Amazon have been used with pasture that has generated great concern regarding changes in soil physical attributes and its aggregation state. The objective of this study was to evaluate the spatial variability and possible modifications of soil physical and aggregate attributes in archaeological black dirt under pasture. A grid of 80 x 56 m with 88 sampling points distributed in 8 x 8m were marked. Soil layers at 0-0.05, 0.05- 0.10, and 0.10-0.20m were analyzed for: soil density (SD), total organic carbon (TOC), carbon stock (C stock), meanweight diameter (MWD), macroporosity (Macro), microporosity (Micro), and total porosity (TP). From semivariograms tests it was verified the occurrence of spatial dependence. Even with major pasture cover in the study area it was observed that the values of Ds, Macro, and VTP were above or below the reference values, which may cause restriction for root growth of plants and water infiltration in the soil. The DMP and Ds were COT-dependent because values of both increase or decrease depending on the soil layer. When higher the soil layer there was an increase in carbon stock.
**KEYWORDS:** Geostatistics, management, soil structure.

## 1 I INTRODUÇÃO

A diversidade geológica existente na Amazônia, aliada ao relevo diferenciado e sob a influência de fortes temperaturas e precipitações resultaram na formação das mais variadas classes de solo. Uma das principais características dos solos da Amazônia, é sua baixa fertilidade, no entanto, os solos denominados de terras pretas arqueológicas (TPAs) ocorrentes nessa região, têm se destacado com sua elevada fertilidade natural.

As terras pretas arqueológicas são solos com características de coloração escura, com presença de fragmentos cerâmicos e/ou líticos incorporados aos seus horizontes mais superficiais (KÄMPF & KERN, 2005) e apresentam teor alto a muito alto de fósforo disponível (CAMPOS et al., 2011). Esses solos ocorrem em manchas descontínuas por toda a Amazônia e tem como destinação principal o plantio de subsistência pelas populações locais. Devido ao pouco conhecimento do potencial agrícola, essas áreas vêm sendo convertidas em áreas de pastagens, principalmente na região sul do Amazonas, por sistemas extrativistas rudimentates que promovem modificações nos atributos físicos do solo.

Dentre os atributos físicos mais sensíveis a essas mudanças, destacam-se: a estabilidade de agregados, densidade do solo, a macroporosidade e teor de carbono orgânico. Tais atributos são indicadores utilizados para verificar as alterações no solo (VASCONCELOS et al., 2010; VIEIRA et al., 2011). Dentre as diversas maneiras de verificar mudanças nos atributos do solo, a análise geoestatística é uma das mais eficazes (ALHO et al., 2014). O comportamento dos atributos físicos pode ser monitorado pela distribuição espacial. Segundo Souza et al. (2004), os atributos físicos variam entre pontos relativamente próximos em área de mesma unidade taxonômica, muitas vezes de forma significativa.

Dado à necessidade de entender a variabilidade espacial dos atributos físicos e o carbono orgânico do solo, vários estudos já foram realizados enfatizando variações causadas pelo próprio uso e manejo em áreas de TPAs (AQUINO et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2013), porém é escassa ou não há informações que tratam a variabilidade espacial dessas áreas sob pastagem.

Dessa forma, nesse trabalho objetivou-se verificar a variabilidade espacial dos atributos físicos e o estado de agregação do solo em área de terra preta arqueológica sob pastagem na região de Manicoré, AM.

## 2 I MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está situada no sul do Estado do Amazonas, nas mediações da comunidade de Santo Antônio do Matupi, às margens da BR 230, Transamazônica, região de Manicoré, AM. As coordenadas geográficas são 07° 53' 36 84" de latitude Sul e 61° 23'54,49" de longitude Oeste e com altitude média de 83 m. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo tropical chuvoso, apresentando um período seco de pequena duração (Am), temperaturas variando entre 25 e 27 °C e precipitação média anual de 2.500 mm (Brasil, 1978).

O material de origem é proveniente da Formação Içá, caracterizada com produto de sedimentação pleistocênica, coberta por depósitos eólicos. O relevo é constituído por platôs com superfícies planas, sendo a zona de borda marcada por colinas e cristas alinhadas e localmente escarpadas (CPRM, 2001). A pastagem foi implantada há 07 anos sob pastejo extensivo, sob o cultivo de *Brachiaria brizanta*. O solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo.

Estabeleceu-se uma malha amostral de 80 x 56 m que continham 88 pontos de amostragem georreferenciados dispostos em malha de 8 x 8 m. Em cada ponto realizou-se a coleta de solo para as amostras deformadas e indeformadas nas camadas: 0-0,05; 0,05-0,010 e 0,10-0,20 m (Figura 1).

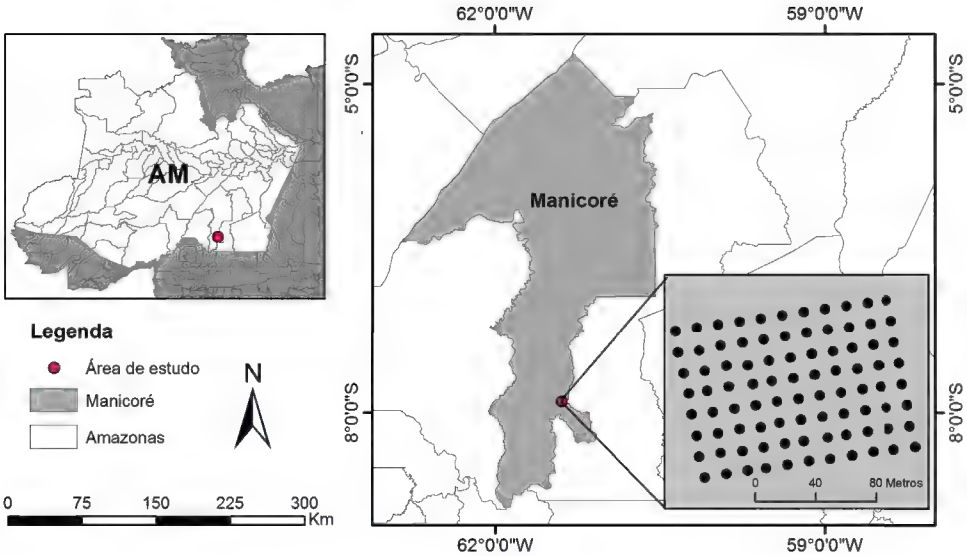



Figura 1. Mapa de localização da área de estudo e malha amostral.

O estado de agregação das amostras de solo foi avaliado pelo índice de diâmetro médio ponderado (DMP), por via úmida, conforme metodologia descrita por Kemper & Chepil (1965). As amostras de solos foram retiradas em forma de blocos, as quais foram secas ao ar e passadas em peneiras de 9,52 mm e 4,76 mm. Em seguida, os agregados retidos na peneira de 4,76 mm foram empregados na análise da estabilidade de agregados via úmida, colocadas sobre um jogo de peneiras com tamisagem de 2,0 mm; 1,0 mm; 0,5 mm; 0,25 mm; 0,105 mm; e 0,063 mm e submetendo-os a oscilações verticais. Transcorridos 15 min, as porções retidas em cada peneira, foram transferidas para potes de alumínio com auxílio de jatos de água, e secas em estuda a 105°C por um período de 24 h para posterior pesagem.

O carbono orgânico total (COT) foi determinado pelo método de Walkley-Black modificado por Yomans & Bremner (1988). O estoque de carbono (Est C) foi determinado pela expressão proposta por Veldkamp (1994): Est C = (CO x Ds x e)/10, em que Est C = estoque de carbono orgânico (Mg $ha^{-1}$); COT = teor de carbono orgânico total (g $kg^{-1}$); Ds = densidade do solo (kg $dm^{-3}$); e = espessura da camada (cm).

As amostras de solo indeformadas foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água até atingir cerca de 2/3 da altura do anel. O volume total de poros (VTP) foi obtida pela diferença entre a massa do solo saturado e a massa do solo seco em estufa a 105 °C durante 24 h. A microporosidade (Micro) do solo foi determinada pelo método da mesa de tensão a 6 kPa, conforme Embrapa (1997). Pela diferença entre a VTP e a Micro, obteve-se a macroporosidade (Macro). A densidade do solo (Ds) foi calculada

pela relação entre a massa seca a 105 °C durante 24 h da amostra de solo do cilindro volumétrico e o volume do mesmo.

A caracterização da variabilidade espacial, foi utilizada a análise geoestatística. O semivariograma experimental foi estimado pela Eq. (1).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

em que:

γ (h) - semivariância estimada a partir dos dados experimentais;

Z - valores medidos nos pontos xi e xi + h;

N(h) - número de pares de valores medidos separados por uma distância h;

Com os dados obtidos, foram efetuados a estatística descritiva dos dados e a hipótese de normalidade avaliada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov por meio do software Minitab 14. Os semivariogramas foram ajustados ao melhor modelo matemático por meio da validação cruzada (VC) "cross-validation" e coeficiente de terminação ($R^2$) pelo software GS+. Para a confecção dos mapas espaciais utilizou-se o software Surfer versão 8.0.

O grau de variabilidade foi estimado pelo coeficiente de variação (CV) dos atributos, conforme sugerido por Warrick & Nielsen (1980) que consideram baixa variabilidade quando CV < 12%; média para o intervalo 12-60% e alta variabilidade quando CV > 60%. A análise do grau de dependência espacial (GDE) foi realizada segundo Cambardella et al. (1994) que preconizam a proporção em porcentagem do efeito pepita ($C_0$) em relação ao patamar ($C_0$+$C_1$) e apresentam: (a) dependência forte < 25%; (b) dependência moderada entre 25 e 75% e (c) dependência fraca > 75%.

## 3 I RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise descritiva dos dados indicaram ajuste a uma distribuição normal (Tabela 1). Os índices de assimetria e curtose apresentaram valores próximos de zero, com exceção do DMP e Micro na camada 0,05-0,10m. A média e a mediana para todos dos atributos foram próximos. De acordo com Campos et al. (2013), quando uma distribuição é simétrica, os valores da média e mediana são coincidentes. Em todos os casos, com exceção para o DMP, os atributos ajustaram-se à distribuição normal determinada por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov.

Os valores médios de densidade do solo foram baixos, variando entre 1,27 e 1,29 kg $cm^{-3}$, semelhantes aos valores obtidos por Santos et al. (2013) em estudos com TPA's. Segundo Steinbeiss et al. (2009), a baixa Ds está relaciona aos altos teores de carbono orgânico e a intensa atividade biológica. Os dados deste trabalho demonstram o efeito do pisoteio dos animais sobre a Ds nas camadas superficiais. O mesmo foi observado por Conte et al. (2011), os quais relataram aumento da Ds na camada 0-0,05 m.

| Estatística descritiva | DMP | Ds | Est C | COT | Macro | Micro | VTP |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (mm) | kg cm$^{-3}$ | Mg há$^{-1}$ | g kg$^{-1}$ | ----------m m$^{-3}$---------- | | |
| | | | | 0-0,05m | | | |
| Média | 3,14 | 1,29 | 88,92 | 137,06 | 0,11 | 0,24 | 0,39 |
| Mediana | 3,16 | 1,30 | 89,05 | 136,93 | 0,12 | 0,23 | 0,38 |
| CV[1] | 3,14 | 9,13 | 8,75 | 4,06 | 23,47 | 11,74 | 8,81 |
| Curtose | 0,71 | -0,01 | -0,10 | 1,49 | 0,55 | 2,98 | 1,52 |
| Assimetria | 1,03 | 0,37 | -0,33 | -0,72 | 0,47 | 0,05 | 0,37 |
| d[2] | 0,03$^{ns}$ | 0,15* | 0,15* | 0,15* | 0,08* | 0,08* | 0,09* |
| | | | | 0,05-0,10m | | | |
| Média | 3,12 | 1,27 | 86,16 | 135,28 | 0,18 | 0,24 | 0,42 |
| Mediana | 3,19 | 1,29 | 86,75 | 135,56 | 0,17 | 0,23 | 0,40 |
| CV[1] | 5,52 | 8,05 | 7,22 | 1,68 | 21,43 | 11,08 | 9,09 |
| Curtose | 7,74 | -0,74 | -0,67 | 0,41 | 1,07 | 4,78 | 0,59 |
| Assimetria | -2,49 | 0,17 | -0,15 | -0,68 | 0,57 | 1,18 | 0,10 |
| d[2] | 0,01$^{ns}$ | 0,15* | 0,15* | 0,15* | 0,15* | 0,15* | 0,15* |
| | | | | 0,10-0,20m | | | |
| Média | 3,01 | 1,27 | 164,19 | 133,91 | 0,22 | 0,21 | 0,43 |
| Mediana | 3,07 | 1,23 | 163,9 | 134,1 | 0,23 | 0,21 | 0,44 |
| CV[1] | 6,55 | 8,39 | 7,69 | 1,56 | 15,07 | 11,84 | 7,67 |
| Curtose | 0,59 | 0,10 | 0,20 | 1,18 | 0,03 | 1,26 | -0,16 |
| Assimetria | -1,01 | 0,22 | 0,16 | 0,50 | 0,07 | 0,69 | 0,17 |
| d[2] | 0,01$^{ns}$ | 0,15* | 0,15* | 0,15* | 0,15* | 0,09* | 0,15* |

[1]CV: coeficiente de variação; [2]d: teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov, *significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 1. Medidas descritivas dos dados do diâmetro médio ponderado (DMP), densidade do solo (Ds), carbono orgânico total (COT), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), volume total de poros (VTP) em diferentes camadas.

Quanto a agregação do solo, observou-se que os agregados estáveis e de maior diâmetro (DMP), foram encontrados, de forma que constante nas camadas de 0,0-0,05 e 0,05-0,10 m. Os menores valores foram verificados na camada 0,10-0,20 m. Em estudos realizados com agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas de manejo, Salton et al. (2008), observou o efeito dos sistemas de manejo, com presença de pastagens, na variação do DMP em camada, sendo reduzido à medida que aumenta a camada avaliada.

Macroagregados formados por processos físicos, por meio do pisoteio de animais, podem não ser estáveis. Contudo, o que confere maior estabilidade aos agregados são os agentes cimentantes ligados a aspectos biológicos, como a atividade microbiana, liberação de exsudatos por raízes, crescimento e funcionamento das raízes, crescimento e morte dos tecidos, entre outros. A utilização do DMP como variável isolada, não é um

bom indicativo da qualidade estrutural do solo, pois solos compactados podem apresentar elevada estabilidade de agregados em água e, consequentemente, maiores valores de DMP, porém as relações na distribuição entre microporos, macroporos e a porosidade total encontram-se alteradas.

Menores valores do estoque de carbono foram obtidos nas duas camadas superficiais, o que foi influenciado, principalmente, pelos maiores valores de densidade do solo. Provavelmente, a maior densidade do solo na camada superficial é decorrente do pisoteio do gado. O maior valor do estoque de carbono foi encontrado na última camada. Ao estudarem os estoques de carbono em tabuleiros costeiros cultivados com cana-de-açúcar, Chaves & Farias (2008) observaram maiores estoques de carbono na camada 0-0,30 m.

Os coeficientes de variação (CV) indicaram homogeneidade dos dados (CV<12) segundo Warrick & Nielsen (1980). Como exceção, a macroporosidade teve valores de CV medianos (23,47, 21,4 e 15,07% respectivamente), em concordância com os resultados obtidos por Aquino et al. (2014) em estudo com área de pastagem, e Aquino et al. (2014) em área com TPA.

Constatou-se que os valores médios da Micro permaneceram praticamente constantes nas duas primeiras camadas, com pequena diminuição na última camada. Já a macroporosidade e a porosidade total apresentaram comportamento inverso. Para Santos et al. (2012), o crescimento das raízes pode ser prejudicada quando a macroporosidade do solo é reduzida a valor inferior a $0,15 m^3 m^{-3}$. Os resultados obtidos podem ser consequência do pisoteio dos animais, que modificam o tamanho de agregados e aumentam a proporção de microporos em relação aos macroporos, principalmente na camada superficial.

Os parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas para os diferentes atributos são apresentados na Tabela 2. Os valores da validação cruzada (VC) oscilaram entre 0,61 e 1,01. De acordo com Alho et al.(2014) quanto mais próximos de 1 a VC, maior a confiabilidade e mais eficiente o modelo para representar o estudo. O coeficiente de determinação ($r^2$) dos semivariogramas revelam ótimos ajustes, oscilando entre 0,52 e 0,97. Todavia, é válido considerar que os atributos tiveram os menores valores de $C_0$ indicando uma maior representatividade da variabilidade espacial destes atributos na área de estudo.

A variação da razão de dependência (RD) foi de 3 a 50 indicando que os atributos apresentam um máximo de 50% de aleatoriedade nos dados de amostragem. Todos os atributos apresentaram dependência espacial, segundo Cambardella et al. (1994), a RD foi classificada, como forte e moderada. Lima et al. (2010) afirmam que quanto maior a dependência espacial da variável melhor estrutura espacial e maior precisão podem ser obtidas na estimativa em locais não amostrados.

| Parâmetros | DMP | Ds | Est C | COT | Macro | Micro | VTP |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 0-0,05m | | |
| Modelo | Esf. | Esf. | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. | Esf. |
| $C_0$ | 0,0035 | 0,0003 | 5,4000 | 6,4100 | 0,9100 | 0,9000 | 0,30 |
| $C_{0+}C_1$ | 0,0073 | 0,0123 | 48.84 | 20,5900 | 8,5410 | 7,7080 | 8,11 |
| [1]RD | 49 | 3 | 11 | 31 | 11 | 12 | 11 |
| a (m) | 53 | 14 | 17 | 28 | 19 | 15 | 13 |
| $r^2$ | 0,85 | 0,92 | 0,94 | 0,80 | 0,88 | 0,52 | 0,70 |
| [3]VC | 0,89 | 0,82 | 0,78 | 0,83 | 0,70 | 0,76 | 0,96 |
| | | | | 0,05-0,10m | | | |
| Modelo | Esf. | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. |
| $C_0$ | 0,0013 | 0,00127 | 4.10 | 0,4600 | 1,2400 | 1,2100 | 1,46 |
| $C_{0+}C_1$ | 0,0275 | 0,0099 | 36.57 | 4,4690 | 11,7900 | 6,0080 | 12,07 |
| [1]RD | 5 | 13 | 11 | 10 | 11 | 20 | 12 |
| a (m) | 21 | 24 | 15 | 17 | 19 | 34 | 17 |
| $r^2$ | 0,90 | 0,97 | 0,91 | 0,74 | 0,90 | 0,61 | 0,84 |
| [2]VC | 0,69 | 0,88 | 0,72 | 0,82 | 0,67 | 1,01 | 0,65 |
| | | | | 0,10-0,20m | | | |
| Modelo | Exp. | Exp. | Esf. | Esf. | Exp. | Exp. | Exp. |
| $C_0$ | 0,0040 | 0,0011 | 5,70 | 2,251 | 1,0500 | 0,5200 | 5,7700 |
| $C_{0+}C_1$ | 0,0354 | 0,0088 | 130,3 | 4,5030 | 9,5500 | 4,2670 | 11,550 |
| [1]RD | 11 | 12 | 4 | 50 | 11 | 12 | 50 |
| a (m) | 17 | 21 | 14 | 43 | 19 | 19 | 53 |
| $r^2$ | 0,69 | 0,85 | 0,75 | 0,91 | 0,88 | 0,94 | 0,94 |
| [2]VC | 0,99 | 0,98 | 0,95 | 0,81 | 0,61 | 0,80 | 0,72 |

DMP: diâmetro médio ponderado; Ds: Densidade do solo; COT: carbono orgânico total; Esf.:Esférico; Exp.: Exponencial; $C_0$: efeito pepita; $C_{0+}C_1$: patamar; [1]RD: razão de dependência espacial; $r^2$: coeficiente de determinação; [2]VC: validação cruzada.

Tabela 2. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais em área dos atributos do solo em diferentes camadas.

Os atributos DMP, Ds, Est C, COT, Macro, Micro e VTP, apresentaram estruturas de dependência espacial, conforme demonstrado pelos ajustes ao modelo esférico e exponencial. De maneira geral, os atributos que mostraram maior e menor continuidade espacial foi o DMP e Ds na camada superficial. O DMP se ajustou ao modelo esférico, com um raio de dependência espacial de 53 m (alcance) e um RD de 49% de aleatoriedade nos dados; para a Ds, o modelo foi o esférico, com um raio de dependência espacial de 14 m, e uma razão de aleatoriedade de 3%.

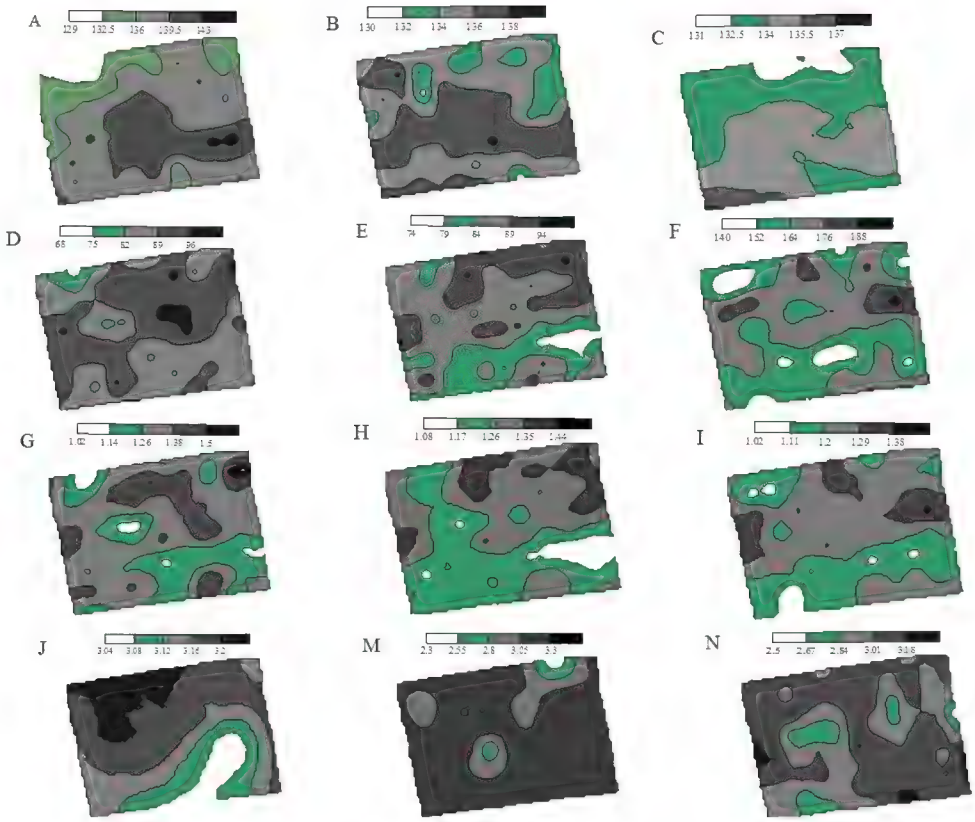



Figura 2. Mapas de distribuição espacial nas camadas 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente para o carbono orgânico total (COT: A, B e C); estoque de carbono (Est C.: D, E e F); densidade do solo (Ds: G, H e I); diâmetro médio ponderado (DMP: J, M e N).

Observando os mapas de krigagem para o COT e DMP (Figura 2) pode-se afirmar que há relação espacial, visto que, as escalas de solo que apresentam os maiores valores do DMP nas camadas de 0-0,05, e 0,05-0,10 m, coincidem, onde há predominância dos maiores valores do COT. Enfatizando a importância do COT para agregação do solo (Rozane et al., 2010). Em estudo realizado em diferentes manejos, Wending et al. (2015), observou que o COT em área de pastagem, apresentou maior teor de carbono, quando comparado com outros manejos. Para Santos et al. (2013) os elevados teores de COT são características de TPAs. É válido ressaltar que a agregação do solo pode ser alterada de forma direta pelo manejo e indireta por fatores bióticos e abióticos, sendo considerado, como indicador físico de qualidade dos solos.

Observa-se que os menores valores de Est C ocorreram nas camadas 0-0,05 e 0,05-0,10 m, havendo um acréscimo na camada de 0,20-0,30 m, influenciado pelos maiores valores de Ds. Provavelmente, os maiores valores de Ds na camada superficial é atribuído ao pisoteio animal, uma vez que, é notório a sua influência nas áreas periféricas, ou seja,

nas bordas do mapa. Em estudos realizado por Alho et al. (2014) com agregados e estoque de carbono em campo natural e floresta, relataram que o conteúdo de COT foi determinante para os resultadosde Est C.

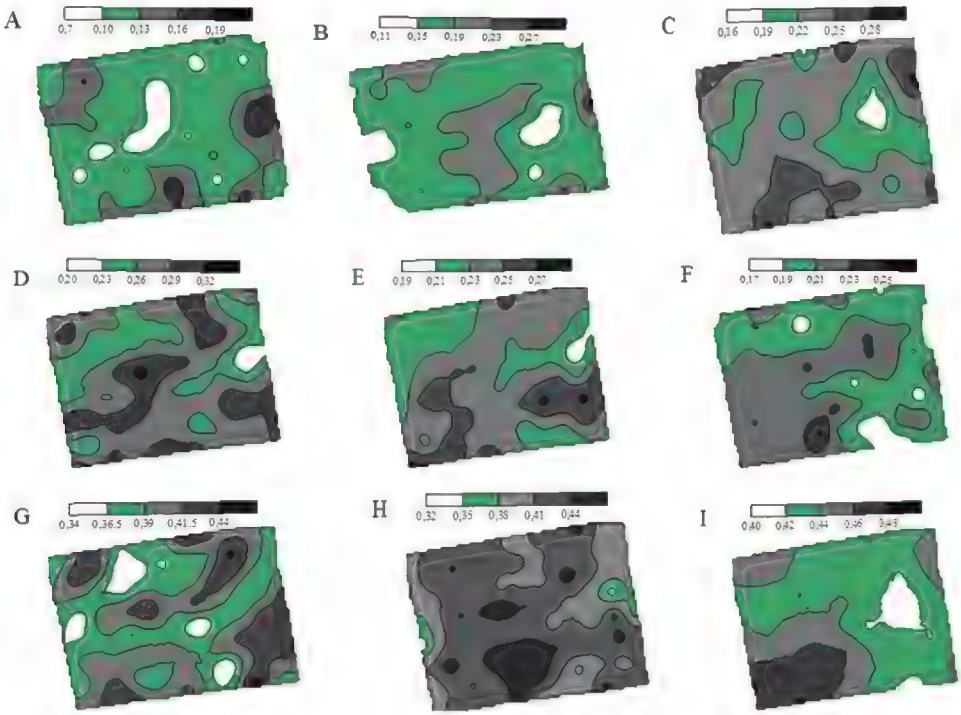



Figura 3. Mapas de distribuição espacial nas camadas 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente para a macroporosidade (Macro: A, B e C), microporosidade (Micro: D, E e F) e volume total de poros (VTP: G, H e I).

O VTP apresentou correlação positiva com a Macro, o qual é verificado nos mapas destes atributos (Figura 3). A Macro é um atributo inteiramente ligado ao crescimento das plantas, e seus valores ficaram acima de 0,10 $m^3 m^{-3}$, segundo Kiehl (1979), valores abaixo de 0,10 $m^3 m^{-3}$ prejudicam o desenvolvimento das raízes, a infiltração de água e aeração do solo. Observa-se que os maiores valores da Micro se concentram na camada superficial (0,32 $m^3 m^{-3}$), indicando uma forte relação com a Ds (Figura 2). Já o VTP, apresentou seus valores quase contínuos nas primeiras camadas, com acréscimo considerável na última camada.

## 4 I CONCLUSÕES

O pisoteio animal provocou modificações no tamanho de agregados e aumento da proporção de microporos em relação aos macroporos, principalmente na camada

superficial.

O DMP e a Ds apresentaram dependência de COT, pois os valores de ambos atributos aumentam ou diminuem de acordo com a camada.

Em camadas, os estoques de carbono estiveram mais relacionados à densidade do solo do que propriamente aos teores de carbono orgânico.

## REFERÊNCIAS


ALHO, L. C., CAMPOS, M. C. C., SILVA, D. M. P., MANTOVANELLI, B. C., SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e estoque de carbono em Cambissolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, p.246-254, 2014.

AQUINO, R. E., CAMPOS, M. C. C., MARQUES JÚNIOR, J., OLIVEIRA, I. A., MANTOVANELLI, B. C., SOARES, M. D. R. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em latossolo sob floresta nativa e pastagem na Região de Manicoré, Amazonas. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.38, p.397-406, 2014.

AQUINO, R. E., CAMPOS, M. C. C., OLIVEIRA, I. A. MARQUES JÚNIOR, J., SILVA, D. M. P., SILVA, D. A. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos antropogênico e não antropogênico na região de Manicoré, **Am. Bioscience Journal**, v. 30, p.988-997, 2014a.

BRASIL. **Ministério das Minas e Energia**. Projeto Radambrasil, folha SB. 20, Purus. Rio de Janeiro, 1978. 561 p.

CAMBARDELLA, C. A., MOORMAN, T. B., NOVAK, J.M., PARKIN, T. B., KARLEN, D. L., TURCO, R.F., KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society**, v. 58, p.1501-1511, 1994.

CAMPOS, M. C. C. RIBEIRO, M. R., SOUZA JÚNIOR, M. S., RIBEIRO FILHO, M. R., SOUZA, R. V. C. C., ALMEIDA, M. C. Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, v.70, n.3, p.598-609, 2011.

CAMPOS, M. C. C. C., SANTOS, L. A. C., SILVA, D. M. P., MANTOVANELLI, B. C., SOARES, M. D. R. Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas**. Revista Agro@mbiente On-line**, v. 6, p. 102-109, 2012.

CAMPOS, M.C.C., SOARES, M.D.R., SANTOS, L.A.C., OLIVEIRA, I.A. & AQUINO, E.A. Spatial variability of physical attributes in Alfissol under agroforestry, Humaitá region, Amazonas state, Brazil. **Revista Ciência Agrária**, v.56, p.149-159, 2013.

CHAVES, L. H. G., FARIAS, C. H. A. Variabilidade espacial do estoque de carbono nos Tabuleiros Costeiros da Paraíba: Solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 3, p. 20-25, 2008.

CONTE, O., WESP, C. L., ANGHINONI, I, CARVALHO, P. C. F., LEVIEN, R. NABINGER, C. Densidade, agregação e frações de carbono de um argissolo sob pastagem natural submetida a níveis de ofertas de forragem por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p. 579-587, 2011.

CPRM. Centro de Pesquisa de Recursos Minerais. Hidroclimatologia, geologia, recursos minerais, geomorfologia e unidades de paisagens. Manaus, 2001. 93p. (Relatório Técnico).

EMBRAPA - **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro: CNPS, 1997. 212p.

KÄMPF, N. & KERN, D. C. O solo como registro da ocupação humana pré-histórica na Amazônia. In: Torradovidal, P., Alleoni, L. R. F., Cooper, M. & Silva, A.P., (eds). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. p.277-320.

KEMPER, W. D., CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: Black, C. A. (ed.). Methods of soil analysis. Madison: **American Society of Agronomy**, 1965. p.499-510.

KIEHL, E. J. Manual de edafologia: Relações solo-planta. 1.ed.São Paulo: **Agronômica Ceres**, 1979. 264p.

LIMA, J. S. S., SOUZA, G. S., SILVA, S. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos químicos do solo em área de vegetação natural em regeneração. Revista Árvore, v.34, p.127-136, 2010.

OLIVEIRA, I. A., CAMPOS, M. C. C., SOARES, M. D. R., AQUINO, R. E., MARQUES JÚNIOR, J., NASCIMENTO, E. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em um cambissolo háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p.1103-1112, 2013.

ROZANE, D. E., CENTURION, J. F., ROMUALDO, L. M., TANIGUCHI, C. A. K., TRABUCO, M., ALVES, A. U. Estoque de carbono e estabilidade de agregados em um Latossolo Vermelho distrófico, sob diferentes manejos. **Bioscience Journal**, v. 26, p. 24-32, 2010.

SALTON, J. C., MIELNICZUK, J., BAYER, C., BOENI, M., CONCEIÇÃO, P.C., FABRÍCIO, A.C., MACEDO, M. C. M., BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p. 11-21, 2008.

SANTOS, D., SOUZA, E. G., NÓBREGA, L. H. P., BAZZI, C. L., GONÇALVES JÚNIOR, A. C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo vermelho após cultivo de soja. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.843-848, 2012.

SANTOS, L. A. C., CAMPOS, M. C. C., AQUINO, R. E., BERGAMIN, A. C., SILVA, D. M. P., MARQUES JUNIOR, J., FRANÇA, A. B. C. Caracterização de terras pretas arqueológicas no Sul do Estado do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 825-836, 2013.

SILVA, F. W. R., LIMA, H. N., TEIXEIRA, W. G., MOTTA, M. B., SANTANA, R. M. Caracterização química e mineralogia de solos antrópicos (Terras Pretas de Índio) na Amazônia Central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.673-681, 2011.

Souza, Z. M., Marques Júnior, J., Pereira, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 937-944, 2004.

STEINBEISS, S., GLEIXNER, G., ANTONIETTI, M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. **Soil Biology and Biochemistry**, v.41, p.1301-1310, 2009.

VASCONCELOS, R. F. B., CANTALICE, J. R. B., OLIVEIRA, V. S., COSTA, Y. D. J., CAVALCANTE, D. M. Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.34, p.309-316. 2010.

VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science Society American Journal**, v. 58, p. 175-180, 1994.

Vieira, S. R., Dechen, S. C. F., Siqueira, G. M., Dufrac, G. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos relacionados com o estado de agregação de dois Latossolos cultivados no sistema de semeadura direta. **Bragantia**, v.70, p.185-195, 2011.

WARRICK, A. W., NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. Applications of soil physics. New York: Academic Press, 1980. p.319-344.

WENDLING, B., VINHA-FREITAS, I. C., OLIVEIRA, R. C. DE, BABATA, M. M., BORGES, E. N., Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. **Bioscence Journal**, v. 28, p.256-265, 2012.

YOEMANS, J. C., BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil**. Communication Soil Science Plant Anal**. v.19, p.1467-1476. 1988.

# CAPÍTULO 8

# VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM TERRA PRETA DE ÍNDIO SOB CULTIVO DE CAFÉ CONILON

*Data de aceite: 18/05/2021*
*Data de submissão: 11/05/2021*

**Pedro Cardoso Mota Júnior**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://lattes.cnpq.br/0421375811578499

**Milton César Costa Campos**
Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal da Paraíba
Areia - Paraíba
https://orcid.org/0000-0002-8183-7069

**Bruno Campos Mantovanelli**
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria – Rio Grande do Sul
https://orcid.org/0000-0003-4291-1729

**Uilson Franciscon**
Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://lattes.cnpq.br/1521927742256456

**José Mauricio da Cunha**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
https://orcid.org/0000-0003-4057-1708

**RESUMO:** A conversão de ecossistemas naturais em sistemas agrícolas provoca alterações significativas nos atributos do solo, associado ao crescente desmatamento na região amazônica influenciando a desestabilidade do ecossistema. Dessa forma, objetivou-se com este estudo avaliar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de terra preta de índio (TPI) sob cultivo de café Conilon. Foi demarcado um grid amostral com dimensões de 88 × 64 m, com espaçamento regular de 8 m, perfazendo um total de 88 pontos amostrais. Foram coletadas amostras estruturadas e indeformadas nas camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. Realizaram-se as seguintes análises físicas: granulometria, estabilidade de agregados, carbono orgânico total (COT), estoque de carbono (EstC), macroporosidade (MaP), microporosidade (MiP), densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), resistência do solo à penetração (RP) e umidade volumétrica (θ). Os resultados foram submetidos à análise estatística descritiva e geoestatística. As TPI's apresentam grande potencial que podem subsidiar o aumento na produção, visto que estes solos apresentam excelente condição que se refere aos atributos físicos, sendo que nas camadas avaliadas estes não apresentaram nenhuma restrição e impedimento ao sistema radicular da cultura.

**PALAVRAS-CHAVE:** Geoestatística, atributos do solo, manejo, semivariogramas escalonados, TPI.

## SPATIAL VARIABILITY OF PHYSICAL ATTRIBUTES OF THE SOIL IN AMAZONIAN BLACK SOIL UNDER COFFEE CULTIVATION

**ABSTRACT**: The conversion of natural ecosystems into agricultural systems causes significant changes in soil properties associated with the growing deforestation in the Amazon

region influencing the destabilization of the ecosystem. Thus, it is aimed with this study was to evaluate the spatial variability of physical attributes of the soil in black Indian land area (ICC) under Conilon coffee cultivation. It was marked a sampling grid with dimensions of 88 × 64 m, with regular spacing of 8 m, for a total of 88 sampling points, structured and undisturbed soil samples were collected in layers of 0.00 to 0.05; 0.05-0.10; 0.10- 0.20 and 0.20-0.30 m. We conducted the following physical analysis: particle size, aggregate stability, total organic carbon (TOC), carbon stock (EstC), macroporosity (MAP), microporosity (MiP), bulk density (Ds), total porosity (PT), soil penetration resistance (RP) and volumetric water content (θ). The results were submitted to descriptive statistical and geostatistical analysis. The ICC's exhibit great potential that can support the increase in production, since they have excellent soil condition that refers to physical attributes, and evaluated in these layers exhibited no constraint and hindrance to the root culture.
**KEYWORDS:** Geostatistics; soil properties; management; semivariogram staggered, TPI.

## 1 I INTRODUÇÃO

A cafeicultura, atualmente, ocupa uma área de 2,2 milhões de hectares plantados no Brasil, segundo os dados da Companhia Nacional do Abastecimento - CONAB (2016), sendo que o Brasil é maior produtor e o maior exportador mundial de café e deve colher, na safra 2015/16 mais de 40,3 milhões de sacas beneficiadas, sendo que, deste total, cerca de 81,1 % é de café Arábica e o restante de café Conilon. Em relação a produtividade a nível de Amazonas, esta não ultrapassa 9 sacas $ha^{-1}$, e conforme as estimativas recentes da produção, o estado aparece com uma produção muito baixa, muito em função das condições de solos, a qual praticamente não são manejados no que se refere a adubação e correção por práticas de calagem (GONÇALVES et al., 2015).

Em meio à vasta região Amazônica ocorrem áreas em que a característica original do solo foi modificada por processos antrópicos, tais solos são conhecidos como Terras Pretas de Índio (TPI) ou Terra Preta Arqueológica (TPA), podendo ser comumente encontrados na paisagem Amazônica (CAMPOS et al., 2011).

Nos últimos anos, as áreas de TPI vêm sendo constantemente exploradas de forma rudimentar, principalmente para atividades agrícolas, aos quais os processos de uso e manejo provocam alterações significativas em ambientes nativos, degradando o solo (CAMPOS et al., 2012a). A retirada da cobertura vegetal original, para implantação de culturas e práticas de manejo inadequadas, promove modificações nos atributos do solo, limitando sua utilização agrícola e tornando-o mais suscetível à erosão hídrica (CARVALHO FILHO et al., 2009). Estudos sobre uso e manejo dos solos são de fundamental importância para adoção de sistemas produtivos mais compatíveis com a característica do ambiente avaliado (ROZANE et al., 2010).

O conhecimento da distribuição espacial dos atributos do solo em áreas naturais e antropizadas é de extrema importância, pois os processos de formação que imprimiram,

no longo do tempo, somados ao manejo realizado pelo homem, acentuam a variação dos atributos do solo e seu entendimento é fundamental para o refinamento das práticas de manejo e avaliação dos efeitos sobre o ambiente (CAMBARDELLA et al., 1994; CAVALCANTE et al., 2007). De acordo com Oliveira et al. (2015), as dificuldades encontradas em estudos de variabilidade dos atributos do solo se devem a dois fatores: primeiro, grande extensão territorial da região amazônica e poucos pesquisadores; a quantidade de amostras torna a prática onerosa, além da falta de conhecimento e a escolha de um padrão do espaçamento amostral.

Dessa forma, objetivou-se, com este estudo avaliar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de terra preta de índio (TPI) sob cultivo de café Conilon.

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está situada no município de Apuí, sul do estado do Amazonas, as margens da BR 230, sob as coordenadas geográficas de 07° 59' 77 S e 61° 39' 51 W e altitude média de 180 m (Figura 1). A zona climática da região, segundo a classificação de Köppen, pertence ao grupo A (Clima Tropical Chuvoso) e tipo climático Am (chuvas do tipo monção), apresentando um período seco de pequena duração, com precipitação média anual variando entre 2.250 e 2.750 mm, e com período chuvoso iniciando em outubro e prolongando-se até junho. As médias anuais de temperatura variam em torno de 25° C e 27° C, e umidade relativa do ar variam entre 85 e 90% (SDS, 2004).

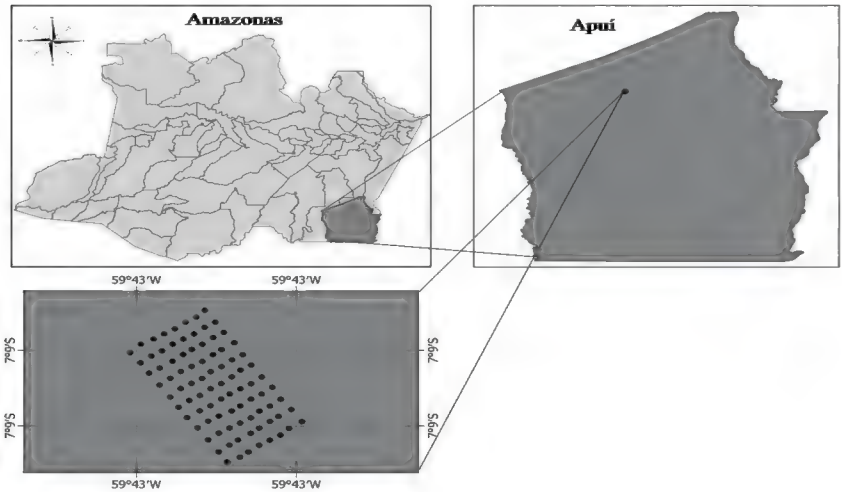



Figura 1. Mapa de localização do município de Apuí, AM e grid amostral da área de estudo.

A geologia da região de Apuí envolve o domínio geológico formado por rochas mais antigas (Proterozóicas e Paleozóicas). A vegetação característica dessa região é a Floresta

Tropical Densa, constituída por árvores adensadas e multiestratificadas de 20 a 50 m de altura, com clima úmido, elevadas temperaturas e alta precipitação (SDS, 2004).

A pesquisa foi realizada entre agosto e dezembro de 2014, sendo delimitado um grid amostral com as dimensões 88 x 64 m, com espaçamento regular de 8 m entre os pontos, perfazendo um total de 88 pontos amostrais em uma área cultivada com café Conilon. Foram coletadas amostras em estrutura preservada na forma de agregados e em anéis volumétricos nas profundidades: 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m perfazendo um total de 352 amostras.

Para determinação da estabilidade de agregados, utilizouse das amostras em estrutura preservada. A separação e a estabilidade dos agregados foram determinadas segundo Kemper e Chepil (1965). Os resultados foram expressos diâmetro médio geométrico (DMG). A análise granulométrica foi determinada pelo método da pipeta, após dispersão da amostra com NaOH 1,0 mol $L^{-1}$ e agitação rápida (6.000 rpm), por 15 min (EMBRAPA, 2011).

A porosidade total foi determinada pelo método da saturação, que consiste na saturação das amostras ates serem levadas para a mesa de tensão. Para a quantificação da macroporosidade (MaP), está foi obtida a partir do equilíbrio do conjunto (anel-solo), após aplicada a tensão de 6 kPa em mesa de tensão. A microporosidade (MiP) foi obtida após subtração do peso do conjunto anel-solo equilibrados à 60 kPa e o seu respectivo peso seco em estufa a 105 °C. A umidade volumétrica (θ) foi obtida pela diferença entre a massa do solo úmido e a massa do solo seco em estufa a 105 °C durante 24 h (EMBRAPA, 2011). A determinação da densidade do solo (Ds) foi realizada pelo método do anel volumétrico, com coleta de amostras em estrutura preservada, em cilindros com volume médio de 98,33 $cm^3$.

Resistência do solo à penetração (RP), foi determinada a partir das mesmas amostras coletadas para avaliação de Ds e porosidade total (PT) do solo, as quais foram determinadas em laboratório utilizando um penetrômetro eletrônico com velocidade constante de 0,1667 mm $s^{-1}$, equipado com uma célula de carga de 200 N, haste com cone de 4 mm de diâmetro de base e semiângulo de 30°, receptor e interface acoplado a um microcomputador para registro das leituras por meio de um software próprio do equipamento (DALCHIAVON et al., 2011).

O carbono orgânico total (COT) foi determinado pelo método de Walkley-*Black* modificado por Yeomans e Bremner (1988), o estoque de carbono (EstC) foi determinado em todas as profundidades de coleta e foi calculado pela expressão (WELDKAMP, 1994), conforme equação (1).

$$EstC = COT \times Ds \times e \qquad (1)$$

Em que:

COT: Carbono orgânico total; Ds: Densidade do solo; e: espessura da camada avaliada.

Após obtenção dos dados, foram realizadas as análises exploratórias, calculando-se a média, a mediana, o desvio padrão, o coeficiente de variação (CV), de assimetria e de curtose, a partir do software estatístico Minitab 14.0 (MINITAB, 2000). O CV foi calculado com base no critério de Warrick e Nielsen (1980), que classifica o CV como baixo <12%, médio de 12% a 24% e alto >24%. Para a hipótese de normalidade, foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov. Para a caracterização da variabilidade espacial, utilizou-se a análise geoestatística. Sob a teoria da hipótese intrínseca, o semivariograma experimental foi estimado pela equação (2):

$$\hat{\gamma}(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i)-Z(x_i+h)]^2 \qquad (2)$$

Onde: (h) é o valor da semivariância para uma distância h; N(h), o número de pares envolvidos no cálculo da semivariância; Z(xi), o valor do atributo Z na posição xi; Z(xi+h), o valor do atributo Z separado por uma distância h da posição xi.

Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de $\hat{\gamma}(h)$ são definidos os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma (efeito pepita, $C_0$; variância estrutural, $C_1$; patamar, $C_0 + C_1$; e alcance, a) (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985). Na determinação da existência ou não da dependência espacial (DE), utilizou-se o exame de semivariogramas, por meio do programa GS+ (ROBERTSON, 1998). Em caso de dúvida entre mais de um modelo para o mesmo semivariograma, considerou-se o melhor coeficiente de determinação ($R^2$). Para analisar o grau da dependência espacial (GDE) dos atributos em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), em que são considerados dependência espacial forte os semivariogramas que têm efeito pepita menor ou igual a 25% do patamar, moderada quando está entre 25% e 75% e fraca quando for maior que 75%.

Para a modelagem dos semivariograma escalonado, primeiramente foram modelados os atributos do solo no software Gs+, para a escolha do melhor modelo, para que se fosse obtido distância média e semivariância média de cada atributo, estes valores foram colocados em planilha Excel, para a modelagem do semivariograma escalonado pela equação (3).

$$\gamma(h) = C_0 + C_1\left[1 - \exp(-\frac{3h}{a})\right], h \geq 0 \qquad (3)$$

Onde: $C_0 + C_1$ = patamar; a = alcance do semivariograma; Exp = modelo do escolhido para modelagem dos semivariogramas escalonados; h = distância de separação entre duas observações.

## 3 I RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos valores médios obtidos para os atributos físicos (Tabela 1), é notória

a tendência de qualidade estrutural física destes solos de TPI, muito em função de sua origem antropogênica, pois todos os parâmetros físicos avaliados estão dentro dos limites adequados para que ocorra o pleno desenvolvimento das culturas, principalmente para a cultura em questão a qual está implantada na área de estudo. Os valores médios referentes a RP indicaram aumento conforme as variações na profundidade, corroborando Rodrigues et al. (2015) no qual estudaram os atributos físicos em solos de TPI sob pastagem. Mesmo com este crescente aumento os valores encontrados estão bem abaixo do limite de 2,0 Mpa estabelecido por Araújo et al. (2004), no qual é caracterizado como prejudicial para que ocorra o crescimento e desenvolvimento radicular.

Os resultados obtidos para as variáveis de MaP, MiP, PT e umidade volumétrica, estão adequadas as condições estabelecidas por Araújo et al. (2004) que afirmam que os limites considerados ideais para o pleno desenvolvimento de plantas é de no mínimo 10% para a MaP e umidade do solo de 20 %, pois, é necessário manter o solo acima ou abaixo desses limites para garantir condições adequadas para as plantas, pois MaP inferior a 10% imprime inadequada difusão de oxigênio para atender a demanda respiratória das raízes e o adequado crescimento e atividade de micro-organismos. Outro fator que explica a natureza destas variáveis é o material orgânico presente nestes solos, o que favorece diretamente a aeração, possibilitando assim com que ocorra o equilíbrio de macroporos facilitando assim a distribuição de oxigênio e o equilíbrio de microporos (em seu limite superior de 50 $\mu$m) em condições suficientes para que ocorra o armazenamento de água e redistribuição a matriz do solo, tornando assim está água altamente retida a altas tensões disponível para o sistema radicular.

A estabilidade de agregados apresentada a partir do DMG mostra variação conforme as camadas avaliadas. Para a área de estudo, os valores de DMG obtidos estão relacionados aos baixos valores de Ds nos horizontes antrópicos, corroborando com resultados encontrados por Campos et al., (2011) e Oliveira et al. (2015), no qual estudando TPAs na região Sul do Amazonas encontraram resultados expressivos de DMG associados a baixa Ds. Estudando solos antropogênicos Campos et al. (2012b) encontraram resultados semelhantes ao deste estudo para estas variáveis descritas anteriormente, afirmando também que estes resultados estão relacionados à formação dos solos de TPI's que concentram grandes quantidades de matéria orgânica derivada da queima parcial do carvão vegetal, e conhecendo que as TPI's são formadas por um grande depósito estável de matéria orgânica, contendo aproximadamente 30% de carbono preto, originado da queima incompleta da biomassa, sendo este, um dos possíveis agentes responsáveis pela alta capacidade de estoque de nutrientes no solo, possibilitando a maior aeração e como consequência, a predominância em formações de microagregados (GLASER et al., 2000).

| Estatística Descritiva | MaP | MiP | PT | RP | θ | DMG |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ---------- | $m^{-3}$ $m^{-3}$ | ---------- | MPa | $m^{-3}$ $m^{-3}$ | mm |
| | | | 0,00 - 0,05 m | | | |
| Média | 0,23 | 0,37 | 0,60 | 1,04 | 0,45 | 2,79 |
| Mediana | 0,24 | 0,36 | 0,61 | 1,04 | 0,46 | 2,77 |
| Máximo | 0,29 | 0,41 | 0,66 | 1,84 | 0,62 | 3,33 |
| Mínimo | 0,17 | 0,33 | 0,54 | 0,49 | 0,30 | 2,47 |
| [1]CV (%) | 13,85 | 5,33 | 4,96 | 29,07 | 18,97 | 7,83 |
| Assimetria | -0,28 | -0,05 | -0,36 | 0,39 | 0,14 | 0,14 |
| Curtose | -0,59 | -0,55 | -0,18 | -0,01 | -0,75 | -0,75 |
| [2]d | * | * | * | * | * | * |
| | | | 0,05 - 0,10 m | | | |
| Média | 0,19 | 0,37 | 0,56 | 1,13 | 0,41 | 2,72 |
| Mediana | 0,19 | 0,37 | 0,56 | 1,14 | 0,40 | 2,71 |
| Máximo | 0,28 | 0,42 | 0,65 | 1,67 | 7,46 | 3,25 |
| Mínimo | 0,11 | 0,33 | 0,48 | 0,59 | 2,15 | 2,15 |
| [1]CV (%) | 22,10 | 6,18 | 7,64 | 21,37 | 28,31 | 9,08 |
| Assimetria | 0,09 | 0,38 | 0,01 | -0,14 | 0,56 | 0,56 |
| Curtose | -0,88 | -0,35 | -0,80 | -0,36 | 0,27 | 0,27 |
| [2]d | 0,18 | * | * | * | * | * |
| | | | 0,10 - 0,20 m | | | |
| Média | 0,16 | 0,37 | 0,54 | 1,28 | 0,38 | 2,22 |
| Mediana | 0,17 | 0,37 | 0,54 | 1,25 | 0,37 | 2,21 |
| Máximo | 0,26 | 0,42 | 0,64 | 2,16 | 0,62 | 2,75 |
| Mínimo | 0,06 | 0,33 | 0,47 | 0,55 | 0,02 | 1,70 |
| [1]CV (%) | 31,67 | 5,38 | 7,87 | 32,45 | 25,54 | 11,88 |
| Assimetria | -0,04 | 0,24 | 0,12 | 0,28 | 0,59 | 0,08 |
| Curtose | -0,99 | -0,41 | -0,63 | -0,63 | 0,20 | -0,45 |
| [2]d | 0,19 | * | * | * | * | * |
| | | | 0,20 - 0,30 m | | | |
| Média | 0,11 | 0,39 | 0,51 | 1,71 | 0,33 | 2,50 |
| Mediana | 0,10 | 0,40 | 0,51 | 1,65 | 0,29 | 2,53 |
| Máximo | 0,17 | 0,43 | 0,54 | 2,56 | 0,53 | 2,83 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Mínimo | 0,07 | 0,35 | 0,47 | 1,11 | 0,10 | 1,90 |
| [1]CV (%) | 20,38 | 6,12 | 3,85 | 23,52 | 31,22 | 9,43 |
| Assimetria | 0,47 | -0,27 | -0,34 | 0,75 | -0,08 | -0,71 |
| Curtose | -0,23 | -0,71 | -0,55 | -0,23 | 0,17 | 0,20 |
| [2]d | * | * | * | * | 0,02 | * |

[1]CV: coeficiente de variação; [2]d: teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov; *significativo a 5 % de probabilidade; MaP: Macroporosidade; MiP: Microporosidade; PT: Porosidade Total; RP: Resistência do Solo a Penetração; θ: Umidade Volumétrica; DMG: Diâmetro Médio Geométrico.

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos físico-hídricos em área de Terra Preta de Índio sob cultivo de café em Apuí, AM.

Os baixos valores de Ds encontrados (Tabela 2), são resultantes dos elevados teores de carbono orgânico e de intensa atividade biológica (fauna e raízes), que constroem canais, cavidades e galerias (STEINBEISS; GLEIXNER; ANTONIETTI, 2009). Estudando Ds em solos antrópicos Campos et al. (2012b) e Rodrigues et al. (2015), também encontraram baixos índices para está variável física, o qual atribuíram tais valores aos elevados teores de matéria orgânica desses solos, que contribuem diretamente como fator que possibilita a maior aeração do solo, ocasionando assim baixos índices para a Ds.

Os atributos granulométricos apresentados na Tabela 2, indicam a maior predominância das frações de silte e areia respectivamente, nas camadas avaliadas. A dominância da fração de areia e silte também foi encontrada por Campos et al. (2012b), estudando a caracterização de horizontes antrópicos na região de Apuí - AM, associando esta característica granulométrica com a formação destes solos e materiais constituintes.

Os teores de COT apresentaram grande variação na camada superficial (Tabela 2) corroborando com os resultados obtidos por Cunha et al. (2007) e Campos et al. (2012b) que encontraram maiores teores de carbono nos horizontes A de solos antropogênicos na região Amazônica. Esses resultados podem ser atribuídos ao carbono pirogênico (carvão) proveniente das atividades dos povos indígenas pré-colombianos, conforme destaca Glaser (2000), ou à dominância de estruturas aromáticas, com baixo grau de substituição de oxigênio (Cunha et al., 2007). O EstC apresentou um decréscimo a partir da camada de 0,2 – 0,3 m, sendo esta condição característica das TPI's, visto que em sua grande maioria o horizonte antrópico tem uma camada de aproximadamente 0,4 m, e a partir dessa redução no EstC, o fator de horizonte adjacente é uma condição que reduz estes valores, influenciado pela não ocorrência de resíduos orgânicos oriundos das ações de povos pré-colombianos, corroborando Campos et al. (2012b) estudando a caracterização de solos antrópicos.

| Estatística Descritiva | Areia | Silte | Argila | Ds | COT | EstC |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | g kg$^{-1}$ | | g cm$^{-3}$ | g kg$^{-1}$ | g kg$^{-1}$ |
| | | | 0,00 - 0,05 m | | | |
| Média | 371,95 | 611,30 | 16,74 | 1,07 | 39,03 | 20,75 |
| Mediana | 370,50 | 612,44 | 16,90 | 1,08 | 36,60 | 19,21 |
| Máximo | 426,66 | 666,38 | 18,98 | 1,19 | 62,06 | 32,89 |
| Mínimo | 315,91 | 558,83 | 14,50 | 0,96 | 22,89 | 13,05 |
| [1]CV (%) | 6,55 | 3,95 | 6,34 | 5,44 | 29,43 | 27,63 |
| Assimetria | -0,09 | 0,07 | 0,07 | -0,11 | 0,40 | 0,50 |
| Curtose | 0,11 | -0,01 | -0,01 | 0,05 | -1,06 | -0,93 |
| [2]d | * | * | * | 0,14 | * | 0,18 |
| | | | 0,05 - 0,10 m | | | |
| Média | 417,96 | 568,26 | 13,76 | 1,17 | 35,95 | 20,99 |
| Mediana | 421,96 | 568,65 | 14,14 | 1,18 | 38,31 | 21,02 |
| Máximo | 475,98 | 626,65 | 17,16 | 1,39 | 58,65 | 34,61 |
| Mínimo | 358,28 | 508,39 | 9,83 | 0,97 | 12,84 | 6,87 |
| [1]CV (%) | 7,06 | 5,13 | 12,14 | 8,78 | 31,72 | 32,81 |
| Assimetria | 0,07 | -0,06 | -0,60 | 0,02 | -0,41 | -0,26 |
| Curtose | -0,70 | -0,69 | 0,06 | -0,66 | -0,32 | -0,60 |
| [2]d | * | * | 0,05 | * | 0,00 | 0,00 |
| | | | 0,10 - 0,20 m | | | |
| Média | 349,49 | 631,15 | 19,34 | 1,23 | 35,24 | 43,40 |
| Mediana | 349,01 | 631,35 | 19,27 | 1,23 | 35,52 | 43,23 |
| Máximo | 414,50 | 680,53 | 24,81 | 1,45 | 47,31 | 62,96 |
| Mínimo | 294,74 | 570,45 | 15,05 | 0,93 | 24,24 | 25,71 |
| [1]CV (%) | 7,48 | 3,97 | 10,70 | 10,81 | 14,86 | 18,82 |
| Assimetria | 0,02 | -0,01 | 0,40 | -0,17 | -0,27 | -0,14 |
| Curtose | -0,19 | -0,30 | 0,34 | -0,79 | -0,18 | -0,35 |
| [2]d | * | * | * | * | * | * |
| | | | 0,20 - 0,30 m | | | |
| Média | 310,96 | 667,12 | 21,90 | 1,34 | 11,67 | 15,73 |
| Mediana | 318,72 | 659,57 | 21,82 | 1,35 | 12,00 | 16,44 |
| Máximo | 422,87 | 758,19 | 28,89 | 1,43 | 18,38 | 24,27 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Mínimo | 212,92 | 563,99 | 13,14 | 1,25 | 8,51 | 8,51 |
| [1]CV (%) | 16,33 | 7,02 | 19,22 | 3,33 | 25,74 | 25,75 |
| Assimetria | 0,00 | 0,02 | -0,17 | -0,11 | 0,23 | 0,11 |
| Curtose | -0,41 | -0,39 | -0,84 | -0,21 | -0,38 | -0,60 |
| [2]d | * | * | * | * | * | * |

[1]CV: coeficiente de variação; [2]d: teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov; *significativo a 5 % de probabilidade; Ds: Densidade do Solo; COT: Carbono Orgânico Total; EstC: Estoque de Carbono.

Tabela 2. Estatística descritiva de atributos físicos em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de café em Apuí, AM.

Conforme os resultados referentes as análises de estatística descritiva apresentados nas Tabelas 1 e 2, os valores de média e mediana apresentam distanciamento para areia e COT na camada de 0,0-0,05 m e areia e silte na camada de 0,2-0,3 m, as demais variáveis apresentaram aproximação, indicando assim a distribuição simétrica destes parâmetros, o qual são confirmados pelos valores de assimetria e curtose próximos a zero. No entanto, segundo Guimarães et al. (2010), esta variação entre média e mediana não caracterizam afastamento expressivo da normalidade, apenas evidenciam que, na natureza, não são encontradas distribuições que sejam absolutamente normais. A partir do critério de normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, as informações geradas pela análise exploratória permitem afirmar que as variáveis apresentam distribuição suficientemente simétrica para o emprego das análises geoestatísticas.

A partir do coeficiente de variação (CV), percebe-se que grande parte das variáveis estudadas apresentaram baixa variabilidade dos dados (Tabelas 1 e 2), a exceção de MaP, RP, umidade volumétrica, em todas as camadas avaliadas e argila nas profundidades de 0,05-0,10 m e 0,20-0,30 m ao qual apresentaram média variabilidade, enquanto que COT e EstC nas camadas de 0,0-0,05 e 0,05-0,10 m apresentaram alto CV. Tais resultados obtidos estão em acordo com trabalhos desenvolvidos por Cruz et al. (2010); Campos et al. (2011b) e Aquino et al. (2014), o qual afirmam que a média e baixa variabilidade dos atributos físicos deve-se à similaridade dos processos de formação destes solos antropogênicos.

A partir das análises geoestatísticas identificou-se que as variáveis físicas apresentaram grau de dependência espacial (GDE) variando entre forte apenas para MaP e RP na camada de 0,1-0,2 m enquanto que as demais variáveis apresentaram GDE médio. O processo antrópico ao qual estes solos foram submetidos ao longo dos anos, evidenciam este comportamento, ainda mais associado ao processo de ocupação agrícola que ocasiona a modificação estrutural destes solos e com este fator, acarreta em uma maior variabilidade destes solos. Oliveira et al. (2015) e Rodrigues et al. (2015), encontraram forte e médio GDE para atributos físicos em áreas de TPI's na região Sul do Amazonas.

O ajuste dos semivariogramas pela análise geoestatística evidenciou que a área

de estudo apresentou variabilidade no espaço dos atributos estudados (Tabelas 3 e 4). Os semivariogramas ajustaram-se preferencialmente aos modelos exponenciais, com valores de VC e $R^2$ acima de 0,75. O COT referente a camada de 0,10 - 0,20 m e Argila, Ds e umidade volumétrica referentes a camada de 0,20 - 0,30 m, apresentaram efeito pepita puro (EPP), ou seja, variação espacial aleatória. De acordo com Carvalho et al. (2008) a predominância do modelo matemático esférico predomina para trabalhos em ciência do solo, por outro lado destacam que os modelos de ajuste do semivariograma para as propriedades do solo mais frequentemente encontrados são os modelos esférico e exponencial.

Avaliando o alcance dos semivariogramas individuais, é possível observar que os atributos apresentaram variabilidade espacial menor que o estabelecido na malha amostral (Tabelas 3 e 4). Esses valores de alcance fornecem informações a respeito da heterogeneidade da distribuição espacial em relação às propriedades estudadas no ambiente de estudo, corroborando Oliveira et al. (2015). A distância máxima na qual os atributos estão espacialmente correlacionados, foi comparada para os diferentes atributos do solo na área estudada. A dimensão desse parâmetro indica um raio no qual os valores apresentados são correlacionados. Observou-se que os valores do alcance em sua maioria foram próximos, variando entre 15 e 56 m, o menor alcance foi encontrado para o COT, na profundidade de 0,05-0,10 m e o maior para a RP, na profundidade de 0,00-0,05m (Tabela 3 e 4). Os baixos valores de alcance obtidos, estão relacionados com a baixa territoriedade das TPI's, sendo que estes solos apresentam uma pequena extensão, e desta forma a variabilidade do alcance também é caracterizada como baixa, não se alongando a solos adjacentes, corroborando Rodrigues et al. (2015) e Oliveira et al. (2015).

| Parâmetros | Map | MiP | PT | RP | θ | DMG |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 0,00-0,05 m | | | |
| Modelo | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. |
| Efeito Pepita | 1,67 | 1,62 | 1,60 | 0,04 | 0,00 | 0,10 |
| Patamar | 20,57 | 9,55 | 17,64 | 0,22 | 1,62 | 0,11 |
| Alcance (m) | 34,50 | 46,30 | 22,80 | 56,10 | 26,10 | 16,20 |
| [1]$R^2$ | 0,95 | 0,96 | 0,92 | 0,92 | 0,89 | 0,82 |
| [2]GDE (%) | 8,11 | 16,96 | 9,07 | 21,25 | 0,05 | 9,43 |
| [3]VC (%) | 0,92 | 0,74 | 0,91 | 0,94 | 0,87 | 0,76 |
| | | | 0,05-0,10 m | | | |
| Modelo | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. |
| Efeito Pepita | 1,72 | 0,01 | 3,16 | 0,03 | 0,00 | 0,00 |
| Patamar | 25,33 | 11,53 | 17,80 | 0,24 | 1,22 | 0,13 |
| Alcance (m) | 29,70 | 22,20 | 20,70 | 43,50 | 27,00 | 21,30 |
| [1]$R^2$ | 0,99 | 0,87 | 0,84 | 0,90 | 0,90 | 0,84 |
| [2]GDE (%) | 6,79 | 0,08 | 17,75 | 15,67 | 0,08 | 0,07 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| [3]VC (%) | 0,79 | 0,99 | 0,87 | 0,79 | 0,90 | 0,83 |
| | | | 0,10-0,20 m | | | |
| Modelo | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. |
| Efeito Pepita | 6,95 | 1,82 | 1,99 | 0,06 | 0,00 | 0,00 |
| Patamar | 24,80 | 7,44 | 16,84 | 0,17 | 1,66 | 0,09 |
| Alcance (m) | 21,90 | 47,70 | 23,10 | 40,50 | 25,20 | 18,00 |
| [1]$R^2$ | 0,95 | 0,94 | 0,93 | 0,88 | 0,87 | 0,81 |
| [2]GDE (%) | 28,02 | 24,46 | 11,81 | 36,36 | 0,05 | 9,04 |
| [3]VC (%) | 0,82 | 0,75 | 0,83 | 0,77 | 0,87 | 0,89 |
| | | | 0,20-0,30 m | | | |
| Modelo | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. | Lin | Exp. |
| Efeito Pepita | 0,01 | 0,40 | 0,01 | 0,02 | - | 0,02 |
| Patamar | 20,70 | 7,75 | 17,25 | 0,24 | - | 0,38 |
| Alcance (m) | 15,60 | 23,10 | 31,50 | 17,40 | - | 29,70 |
| [1]$R^2$ | 0,88 | 0,91 | 0,93 | 0,90 | - | 0,85 |
| [2]GDE (%) | 0,04 | 22,85 | 0,05 | 8,33 | EPP | 5,26 |
| [3]VC (%) | 0,91 | 0,76 | 0,86 | 0,81 | - | 0,76 |

MaP: macroporosidade; MiP: microporosidade; VTP: volume total de poros; RP: resistência do solo a penetração; θ: umidade volumétrica; DMG: diâmetro médio geométrico; Esf.: Esférico; Exp.: Exponencial; Lin: Linear; [1]$R^2$: coeficiente de determinação; [2]GDE%: grau de dependência espacial e; [3]VC: validação cruzada.

Tabela 3. Modelos e parâmetros estimados aos semivariogramas dos atributos físico-hídricos em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de café em Apuí, AM.

| Parâmetros | Areia | Silte | Argila | Ds | COT | EstC |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 0,00-0,05 m | | | |
| Modelo | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. | Lin | Exp. |
| Efeito Pepita | 1,00 | 1,00 | 0,60 | 0,04 | - | 3,90 |
| Patamar | 1045,00 | 1350,00 | 4,63 | 0,08 | - | 50,37 |
| Alcance (m) | 25,80 | 34,50 | 26,40 | 18,00 | - | 17,10 |
| [1]$R^2$ | 0,87 | 0,95 | 0,97 | 0,78 | - | 0,85 |
| [2]GDE (%) | 0,09 | 0,07 | 12,95 | 13,45 | EPP | 7,74 |
| [3]VC (%) | 0,97 | 0,99 | 0,75 | 0,80 | - | 0,75 |
| | | | 0,05-0,10 m | | | |
| Modelo | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. |
| Efeito Pepita | 196,00 | 191,00 | 0,01 | 0,03 | 0,10 | 0,10 |
| Patamar | 1246,00 | 1171,00 | 8,56 | 0,01 | 120,40 | 44,35 |
| Alcance (m) | 20,40 | 18,30 | 17,70 | 24,90 | 15,00 | 15,30 |
| [1]$R^2$ | 0,92 | 0,90 | 0,82 | 0,92 | 0,76 | 0,76 |
| [2]GDE (%) | 15,73 | 16,31 | 1,16 | 12,09 | 8,30 | 2,25 |
| [3]VC (%) | 0,85 | 0,83 | 0,79 | 0,94 | 0,86 | 0,75 |
| | | | 0,10-0,20 m | | | |

| Modelo | Exp. | Exp. | Lin | Lin | Exp. | Exp. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Efeito Pepita | 74,00 | 71,00 | - | - | 9,70 | 18,10 |
| Patamar | 714,90 | 579,80 | - | - | 54,27 | 119,40 |
| Alcance (m) | 17,40 | 22,50 | - | - | 27,00 | 26,10 |
| [1]$R^2$ | 0,87 | 0,81 | - | - | 0,76 | 0,84 |
| [2]GDE (%) | 10,35 | 12,24 | EPP | EPP | 0,17 | 0,15 |
| [3]VC (%) | 0,77 | 0,78 | - | - | 0,83 | 0,81 |
| | | | 0,20-0,30 m | | | |
| Modelo | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. |
| Efeito Pepita | 454,00 | 10,00 | 0,01 | 0,01 | 8,10 | 35,90 |
| Patamar | 3546,00 | 3334,00 | 16,27 | 0,01 | 53,62 | 90,64 |
| Alcance (m) | 23,10 | 23,40 | 16,80 | 16,80 | 20,40 | 25,50 |
| [1]$R^2$ | 0,83 | 0,81 | 0,82 | 0,95 | 0,83 | 0,89 |
| [2]GDE (%) | 12,80 | 0,29 | 0,06 | 0,00 | 15,10 | 39,60 |
| [3]VC (%) | 0,84 | 0,75 | 0,85 | 0,72 | 0,84 | 0,78 |

Ds: densidade do solo; COT: carbono orgânico total; EstC: estoque de carbono; Exp.: Exponencial; Lin: Linear; [1]$R^2$: coeficiente de determinação; [2]GDE%: grau de dependência espacial e; [3]VC: validação cruzada.

Tabela 4. Modelos e parâmetros estimados aos semivariogramas das frações areia, silte, argila, Ds, COT e EstC do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de café em Apuí, AM.

Os semivariogramas escalonados dos atributos físicos do solo são apresentados na Figura 2, onde para os atributos estudados o modelo que melhor se ajustou foi o modelo exponencial, tendo o grau de dependência espacial (GDE) alto para areia, silte, argila, Ds, RP, MaP, MiP, PT, θ, DMG e EstC, nas profundidades estudadas, demostrando assim comportamento semelhante entre os atributos avaliados corroborando Oliveira et al. (2015) estudando atributos físicos de solos antrópicos na Amazônia Ocidental.

Avaliando os valores do alcance ajustados aos modelos dos semivariogramas escalonados, observou-se que o menor alcance de 18,97 m foi constatado na profundidade de 0,05-0,10m com e o maior alcance para profundidade 0,00-0,05m com 24,71m. Esses valores a partir dos semivariogramas escalonados evidenciaram que possivelmente existe maior heterogeneidade dos atributos na área de TPI, fato justificado em razão de esses solos serem formados por influência antrópica, o que ocasiona a maior variabilidade dos atributos estudados. Cabe salientar que a baixa variabilidade a partir do CV possibilita uma magnitude diferente dos dados, quando se compara com os semivariogramas escalonados estes, a partir da distribuição de frequência e posicionamento dos pontos na curva possibilitam evidenciar a possível heterogeneidade do ponto de vista espacial dos dados. Em relação ao processo de formação, apesar de terem sofridos as mesmas influencias, mas as alterações antrópicas ocasionam diferentes modificações nos atributos físicos do solo, e este fator ocasiona a heterogeneidade espacial destes solos.

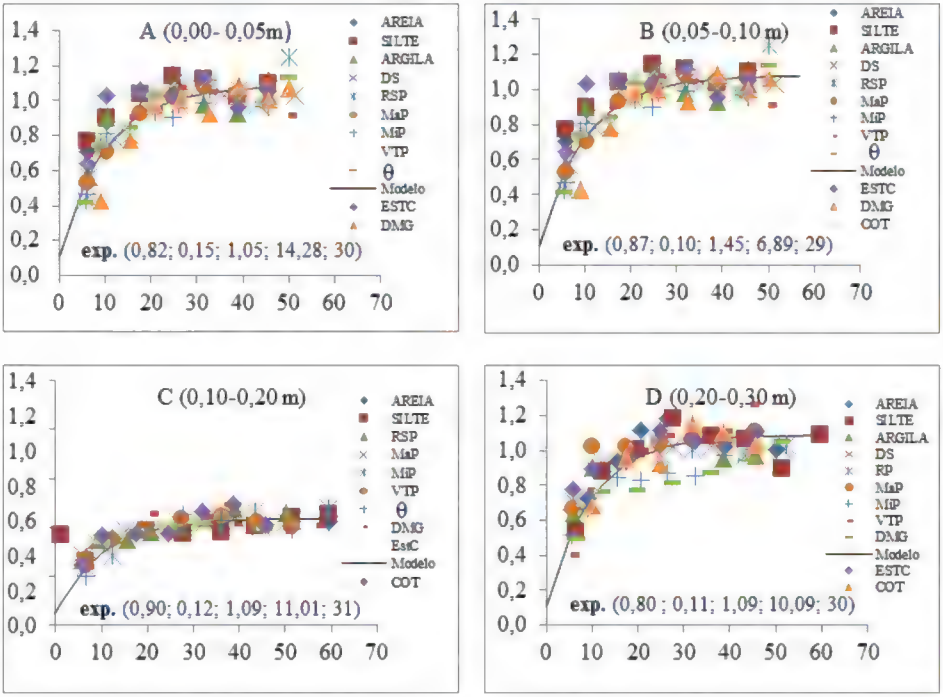



Figura 2. Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonados ajustados aos atributos físicos do solo em área de Terra Preta de Índio sob o cultivo de café Conilon em Apuí, Amazonas. [Modelo (efeito pepita – patamar -alcance –GDE - $R^2$)]. GDE = grau de dependência espacial; $R^2$ = Coeficiente de determinação; Ds: Densidade do Solo; COT: Carbono Orgânico Total; EstC: Estoque de Carbono; MaP: Macroporosidade; MiP: Microporosidade; PT: Porosidade Total; RP: Resistência do Solo a Penetração; θ: Umidade Volumétrica; DMG: Diâmetro Médio Geométrico.

## 4 I CONCLUSÕES

Os atributos físicos avaliados apresentaram estrutura de dependência espacial variando entre fraca a moderada, estando estes adequados ao modelo exponencial, caracterizados como o que melhor se adapta aos atributos físicos do solo e explicam a variabilidade espacial destas variáveis.

Os semivariogramas escalonados são valiosas ferramentas nos estudos geoestatísticos, pois com base nos valores de alcance de dependência espacial pode-se inferir adequadamente sobre o maior ou menor grau de distribuição espacial dos atributos ao longo da área de estudo, além de possibilitar relacionar com a possível relação de distribuição espacial em uma determinada unidade de espaço.

A partir dos resultados médios obtidos percebe-se que as TPI´s apresentam grande potencial do ponto de vista físico do solo para que ocorra desenvolvimento do cafeeiro em seus diferentes estágios de produção, contribuindo assim diretamente com a produção.

## REFERÊNCIAS

AQUINO, R. E., CAMPOS, M. C. C., MARQUES JÚNIOR, J., OLIVEIRA, I. A., MANTOVANELI, B. C., SOARES, M. D. R. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em Latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré, Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 38, p. 397-406, 2014.

ARAÚJO, M. A., TORMENA, C. A., SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 337-345, 2004.

CAMBARDELLA, C. A., MOORMAN, T. B., NOVAK, J. M., PARKIN, T. B., KARLEN, D. L., TURCO, R. F., KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa. **Soil Science Society of American Journal**, v.58, p.1501-1508, 1994.

CAMPOS, M. C. C., RIBEIRO, M. R., SOUZA JÚNIOR, V. S., RIBEIRO FILHO, M. R., SOUZA, R. V. C. C., ALMEIDA, M. C. Caracterização e Classificação de Terras Pretas Arqueológicas na região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, v. 70, p.18-27, 2011.

**CAMPOS, M. C. C., RIBEIRO, M. R., SOUZA JÚNIOR, V. S., RIBEIRO FILHO, M. R., ALMEIDA, M. C. Topossequência de solos na transição Campos Naturais-Floresta na região de Humaitá, Amazonas**. Acta Amazônica, **v. 42, p.387-398, 2012a**.

CAMPOS, M. C. C., SANTOS, L. A. C., SILVA, D. M. P., MANTOVANELLI, B. C., SOARES, M. D. R. Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de 314 solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. **Agro@mbiente On-line**. v. 6, p. 102-109, 2012b.

CAMPOS, M. C. C., SOARES, M. D. R., SANTOS, L. A. C., OLIVEIRA, I. A., AQUINO, R. E. Spatial variability of physical attributes in Alfissol under agroforestry, Humaitá region, Amazonas state, Brazil. **Revista de Ciências Agrárias**. v. 56, p. 149-159, 2013.

CARVALHO FILHO, A., CARVALHO, L. C. C., CENTURION, J. F., BEUTLER, A. N., CORTEZ, J. W., RIBON, A. A. Qualidade física de um Latossolo vermelho férrico sob sistemas de uso e manejo. **Bioscience Journal**, v. 25, p. 43-51, 2009.

CAVALCANTE, E. G. S., ALVES, M. C., SOUZA, Z. M., PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 31, p. 1329-39, 2007.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra Brasileira – Café safra 2015/2016**. Segundo levantamento. v.2, 99p. 2016.

CRUZ, J. S., ASSIS JÚNIOR, R. N., MATIAS, S. S. R., TAMAYO, J. H. C., TAVARES, R. C. Análise espacial de atributos físicos e carbono orgânico em Argissolo vermelho-amarelo cultivado com cana de açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**. v. 34, p. 271-278, 2010. CUNHA, T. J. F., MADARI, B. E., BENITES, V. M., CANELAS, L. P., NOVOTNY, E. H., MOUTTA, R. O., TROMPOWSKY, P., SANTOS, G. A. Fracionamento químico da matéria orgânica e características de ácidos húmicos de solos com horizonte A antrópico da Amazônia (Terra Preta). **Acta Amazônica**, v. 37, p. 91-98, 2007.

DALCHIAVON, F. C., CARVALHO, M. P., NOGUEIRA, D. C., ROMANO, D., ABRANTES, F. L., ASSIS, J. T., OLIVEIRA, M. S. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, p. 8-19, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. **Manual de métodos de análise de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p

GLASER, B., BALASHOV, E., HAUMAIER, L., GUGGENBERGER, G., ZECH, W. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. **Organic Geochemistry**, v.31, p.669-678, 2000.

GONÇALVES, E. T., CARRERO, G., GROSSI, N. T., FIGUEIREDO, V. **Guia para Produção de Café Sustentável na Amazônia: Experiência de Apuí (AM)**. Piracicaba, SP: Imaflora e Idesam, 2015. 33 p.

GUIMARÃES, R. M. L., GONÇALVES, A. C. A., TORMENA, C. A., FOLEGATTI, M. V., BLAINSKI, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas de um Nitossolo sob a cultura do feijoeiro irrigado. Revista de Engenharia Agricola. v. 30, p. 657- 669, 2010.

KEMPER, W. D., CHEPIL, W. S. Aggregate stability and size distribution. In: BLACK, C.A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Madison: ASA, v.1, p. 499-510, 1965.

MINITAB RELEASE 14.1. Statistical Software.US/ Canada. 2000.

OLIVEIRA, I. A., MARQUES JÚNIOR, J., CAMPOS, M. C. C., AQUINO, R. E., FREITAS, L., SIQUEIRA, D.S., CUNHA, J.M. Variabilidade Espacial e Densidade Amostral da Suscetibilidade Magnética e dos Atributos de Argissolos da Região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 39, p. 668-681, 2015.

RODRIGUES, M. D. R., CAMPOS, M. C. C., SOUZA, Z.M., BRITO, W.B.M., FRANCISCON, U., CASTIONE, G.A.F. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob pastagem em Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v. 58, p. 434-441, 2015.

ROZANE, D. E., CENTURION, J. F., ROMUALDO, L. M., TANIGUCHI, C. A. K., TRABUCO, M., ALVES, A. U. Estoque de carbono e estabilidade de agregados de um Latossolo vermelho distrófico, sob diferentes manejos. **Bioscience Journal**. v. 26, p. 24-32, 2010.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - SDS. **Relatório técnico síntese dos diagnósticos: Área estadual Sul de Apuí e Manicoré**. Manaus: 2004.

STEINBEISS, S., GLEIXNER, G., ANTONIETTI, M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. **Soil Biological Biochemical**. v. 41, p. 1301-10, 2009.

TRANGMAR, B. B., YOST, R. S., UEHARA, G. Applications of geoestatistics to spatial studies of soil proprieties. **Advances in Agronomy**, v. 38, p.45-94, 1985.

WARRICK, A.W. e NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. **Applications of soil physics**. New York, 1980. p. 319-344.

YOEMANS, J. C., BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication Soil Science Plant Anal**. v. 19, p. 1467-1476, 1988.

# CAPÍTULO 9

# ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E ESTOQUE DE CARBONO EM ÁREAS DE TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA SOB PASTAGEM E FEIJÃO GUANDU EM NOVO ARIPUANÃ, AM

*Data de aceite: 18/05/2021*
*Data de submissão: 11/05/2021*

**José Maurício da Cunha**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
https://orcid.org/0000-0003-4057-1708

**Denilton Carlos Gaio**
Instituto de Física – Universidade Federal do Mato Grosso
Cuiabá – Mato Grosso
https://orcid.org/0000-0002-1905-4530

**Milton César Costa Campos**
Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal da Paraíba
Areia - Paraíba
https://orcid.org/0000-0002-8183-7069

**Marcelo Dayron Rodrigues Soares**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
https://orcid.org/0000-0003-2942-5320

**Douglas Marcelo Pinheiro da Silva**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://orcid.org/0000-0001-8147-5726

**Alan Ferreira Leite de Lima**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
https://orcid.org/0000-0001-7959-8778

**RESUMO:** Para se avaliar a qualidade do solo e a sustentabilidade em ambientes de Terra Preta Arqueológica da Amazônia, é importante a caracterização dos impactos de uso de solo dos diferentes tipos de cobertura. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar os atributos físicos e o carbono orgânico em áreas de Terra Preta Arqueológica, no município de Novo Aripuanã, AM, sob os cultivos feijão guandu (Cajanus cajan) e pastagem, em comparação com a cobertura de floresta, com base em técnicas de estatística tradicional univariada e multivariada e de geoestatística. Para isso foram delimitadas malhas com espaçamentos regulares e 88 pontos amostrais georreferenciados por malha. Foram coletadas amostras em blocos de solo com estrutura preservada e anéis volumétricos, para a determinação das propriedades físicas e do carbono orgânico do solo. O feijão guandu e pastagem diferem estatisticamente da floresta, que apresentaram características de estabilidade dos agregados acima da média, mas características texturais e carbono orgânico abaixo da média. O modelo exponencial, pelo semivariograma escalonado, mostrou que atributos físicos do solo apresentaram predominância, com grau de dependência de forte a moderado, sendo a área sob feijão guandu com maior variabilidade dos atributos do solo.

**PALAVRAS-CHAVE**: Aripuanã, química e física do solo, TPA sob floresta, usos do solo.

## PHYSICAL ATTRIBUTES AND CARBON STOCK OF SOILS OF ARCHAEOLOGICAL DARK EARTH OF THE AMAZONIA

**ABSTRACT**: In order to evaluate soil quality and sustainability in Amazon Archaeological Dark Earth environments, it is important to characterize the impacts of the use of different cover types. The objective of this work was therefore to evaluate the physical attributes and organic carbon content in areas of "Terra Preta Arqueológica", in the municipality of Novo Aripuanã, AM, under the cultivation of pigeon pea (Cajanus cajan) and pasture, in comparison with forest cover, based on traditional univariate and multivariate statistical techniques and geostatistics. In order to accomplish this, grids with regular spacing and samples with 88 georeferenced points per grid were delimited. Samples of soil blocks with preserved structure and volumetric rings were collected to determine physical properties and organic carbon content. The pigeon pea and pasture soils differ statistically from that of the forest and presented above-average aggregate stability, but texture and organic carbon characteristics were below average. The exponential model showed that the physical attributes of the soil predominated, with a strong to moderate degree of dependence, with the area under pigeon pea presenting the greatest variability of soil attributes.
**KEYWORDS:** Aripuanã, land use, TPA under forest.

## 1 I INTRODUÇÃO

As Terras Pretas Arqueológicas (TPA) são solos cuja característica marcante é a presença de coloração escura e artefatos cerâmicos e/ou líticos indígenas incorporados à matriz dos horizontes superficiais do solo (KÄMPF E KERN, 2005). Elas apresentam uma elevada fertilidade natural incorporada à matriz do horizonte, sendo encontrada na região Amazônica em forma de manchas em meio a uma vasta extensão de terra que, na grande maioria, extremamente pobre em nutrientes.

Muitas dessas áreas são substituídas por atividades voltadas para fins industriais ou produção de alimentos. No entanto, solos preservados em seu estado natural, sob vegetação nativa, apresentam características físicas adequadas ao desenvolvimento das plantas (CALONEGO et al., 2012). Os usos de práticas agrícolas inadequada e de forma intensiva promovem alterações em suas propriedades originais (ROZANE et al., 2010; VIANA et al., 2011; Rossetti e CENTURION, 2015), que por sua vez, a gestão dos solos de forma sustentável, com práticas de conservações apropriadas, é necessária a fim de que se possa evitar sua maior degradação (WHITE et al., 2012).

Normalmente solos em ambientes naturais, por não sofrer interferência humana, apresentam menores densidade do solo e maiores volumes total de poros (CALONEGO et al., 2012), sendo que a densidade do solo apresenta correlação positiva com a microporosidade e negativa com a macroporosidade e porosidade total (CUNHA et al., 2011), fatores que influenciam no processo de compactação do solo (SILVEIRA et al., 2010).

Outros atributos usados para avaliar a qualidade física do solo são a resistência do solo a penetração (RP) e a umidade do solo, que por sua vez estão relacionados com

crescimento e desenvolvimento radicular das plantas (Silveira et al., 2010). Em solos de ambientes naturais, foi observado menor RP em relação ao solo cultivado, ou seja, a densidade do solo é maior sob as plantas de cobertura, que reflete na maior resistência do solo à penetração, que por sua vez, tem apresentado correlação negativa com o teor de carbono orgânica no solo (CUNHA et al., 2011; SILVA et al., 2012).

A matéria orgânica tem influência direta e indiretamente aos atributos do solo (VIANA et al., 2011) e o seu estudo em agro-ecossistema brasileiro é base para que se alcance a sustentabilidade agrícola (CUNHA et al., 2011). É sabido também que práticas de uso e manejo dos solos, e suas variações, interferem no equilíbrio natural dos ecossistemas, alterando os componentes orgânicos tanto em quantidade como em qualidade (MELO E SCHAEFER, 2009). Por outro lado, o teor de carbono orgânico do solo sob floresta é maior do que em solos adjacentes que por sua vez favorece na estrutura do solo (SILVA et al., 2008; ANDRADE et al., 2009).

O uso de práticas agrícolas tem efeito direto sobre os atributos físicos do solo, além de expressivas interferências no teor de carbono orgânico do solo (MATOS et al., 2008; ROZANE et al., 2010; IORI et al., 2012). Nesse sentido, a variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo, em ambientes naturais e transformados, torna-se importante para o entendimento dos processos de evolução a formação do solo e variações desses atributos para diferentes sistemas de uso e manejo do solo (OLIVEIRA et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2015a; AQUINO et al., 2015).

Há a necessidade de estudos relacionados aos atributos do solo de TPAs quanto a suas modificações em determinados usos e manejos dos solos, principalmente quando se compara com ambientes sob floresta. Pesquisa tem avaliado os atributos do solo sobre diferentes ambientes em ralação ao uso do solo sobre TPA (OLIVEIRA et al., 2015b), identificando comportamento muito característico dos atributos do solo em ambientes de TPA. No entanto, não há estudos relacionados aos atributos do solo sobre o uso de TPA em comparação aos ambientes de floresta preservados em áreas de TPA.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os atributos físicos e o estoque de carbono em áreas de Terra Preta Arqueológica sob os cultivos feijão Guandu (FJ) (*Cajanus cajan*) e pastagem (PT), em comparação com a área de floresta (FN), utilizando técnicas de estatística tradicional univariada e multivariada e da geoestatística.

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

O estudo localizou-se no município de Novo Aripuanã (Figura 1), Amazonas, Brasil, entre agosto de 2014 a julho de 2016, situado ao longo da rodovia Transamazônica (BR-230). O clima da região é Clima Tropical Chuvoso, apresentando um período seco de pequena duração. A pluviosidade média varia entre 2,250 e 2,750 mm ao ano, com período chuvoso entre outubro a junho. As temperaturas médias anuais variam entre 25°C e 27°C

e a umidade relativa fica entre 85 e 90% (BRASIL, 1978).

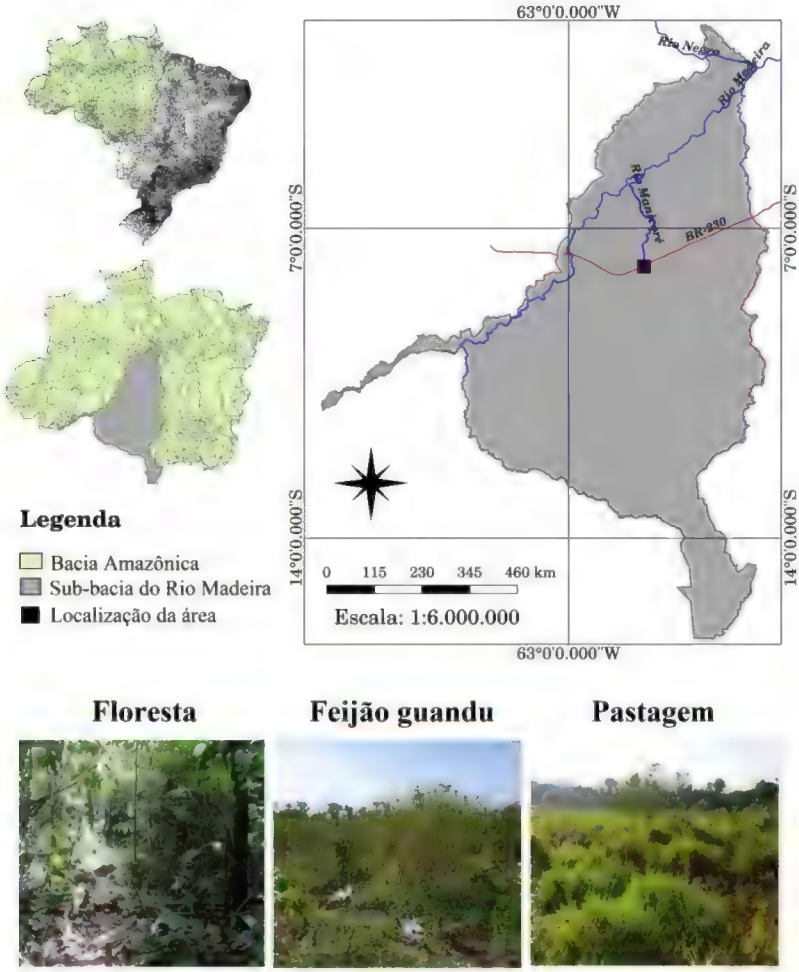



Figura 1. Localização da área de estudo.

A área de TPA sob floresta natural (FN) vem sendo preservado a mais de vinte e cinco anos, com início de recuperação florestal natural com árvores de porte mediano, chegando a apresentar de até quinze metros de altura. Já os usos de TPAs sob cultivo de feijão Guandu (*Cajanus cajan*) (FJ) e pastagem *Brachiaria brizanta* (PT), abrigou nos últimos vinte e cinco anos os cultivos milho, feijão e melancia. Nos últimos oito meses, foi inserido o pasto para atividades de pecuária, preservando uma área do feijão Guandu.

Foram delimitadas três malhas amostrais com 88 pontos de coleta de material por malha, sendo 90 pontos de coleta da área do feijão Guandu. As dimensões das malhas foram de 2.500 m² para a FN, 1.700 m² para o FJ e 4.800 m² para a PT, com espaçamentos regulares entre os pontos de coleta do solo de 6 x 6 m, de 4 x 5 m e de

8 x 8 m, respectivamente. A escolha das dimensões das malhas foi definida no campo, conforme avaliada as dimensões da área de TPA e a respectiva cobertura representativa do solo. Foi coletados blocos de solos com estrutura preservada e anéis volumétricos nas camadas 0,0-0,05 m, 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m, para a determinação das propriedades físicas estruturais, granulométricas e mecânicas do solo, assim como a matéria orgânica. Esses pontos foram georreferenciados com um equipamento de GPS para o mapeamento das áreas, e posteriormente utilizado nas análises geoestatística.

As amostras com estrutura preservada em forma de torrão de solo foram secadas à sombra e posteriormente destorroadas, de forma manual, e passadas em peneira de 9,51 mm de diâmetro e retidas na peneira de 4,76 mm, para as análises relativas à estabilidade de agregados. As amostras retidas na peneira de 2,00 mm foram utilizadas nas análises granulométricas e de matéria orgânica, após passadas em peneira de 250 µm.

O método empregado para a separação e estabilidade dos agregados foi determinado segundo Kemper e Chepil (1965), com modificações nas seguintes classes de diâmetro: 4,76-2,0 mm; 2,0-1,0 mm; 1,0-0,50 mm; 0,50-0,25 mm; 0,25-0,125 mm; 0,125-0,063mm. Os agregados foram colocados em contato com a água sobre a peneira de 2,00 mm e submetidos à agitação vertical em aparelho Yoder (SOLOTEST, Bela Vista, São Paulo, Brasil) por 15 min. Os materiais retidos em cada classe de peneira foram colocados em estufa a 105° C, e em seguida mensurada as respectivas massas em uma balança digital.

Os resultados foram expressos em termos da porcentagem dos agregados retidos em cada uma das classes das peneiras e a estabilidade dos agregados avaliados pelo diâmetro médio ponderado (DMP) e o diâmetro médio geométrico (DMG), definido por:

$$DMP = \frac{\sum_{i=1}^{N} n_i D_i}{\sum n_i} \quad (1)$$

$$DMG = 10^{\frac{\sum_{i=1}^{N} n_i \log D_i}{\sum n_i}} \quad (2)$$

sendo:

$n_i$ = % dos agregados retidos em uma determinada peneira;

$D_i$ = diâmetro médio de uma determinada peneira;

N = número de classes de peneiras.

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, utilizando uma solução normal de NaOH como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de alta rotação por 15 min, seguindo metodologia proposta pela Embrapa (2011). A fração argila foi separada por sedimentação, a areia por tamisação e o silte foi calculado por diferença.

Para as determinações da densidade do solo (Ds), macroporosidade (MaP) e microporosidade (MiP), volume total de poros (VTP) e umidade gravimétrica (Ug), as amostras de anéis volumétricos foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja plástica. Após a saturação, as amostras foram pesadas e

levadas à mesa de tensão para determinação da MiP, sendo submetidas a uma tensão de 0,006 MPa (Embrapa, 2011).

Após atingirem o equilíbrio em um potencial matricial de 0,006 MPa, as amostras foram novamente pesadas e, em seguida, foram feitas as medidas da resistência do solo à penetração (RP), utilizando-se um penetrógrafo eletrônico modelo MA-933, marca Marconi. Posteriormente, as amostras foram levadas à estufa a 105° C para a determinação da Ug, Ds e VTP, pelo método do anel volumétrico, e a MaP foi determinada pela diferença entre VTP e MiP (Embrapa, 2011).

O carbono organico (CO) foi determinado pelo método de Walkley-Black, modificado por Yeomans e Bremner (1988). A matéria orgânica é determinado pelo produto do CO com 1,724 (Embrapa, 2011). Já o estoque de carbono (EC) é definido pela equação 3 :

$$EC = Ds \times h \times CO \tag{3}$$

onde: EC = estoque de carbono (Mg $ha^{-1}$); Ds = densidade do solo (Mg $m^{-3}$); h é a espessura da camada de solo amostrada (cm); CO = teor de C (%).

Após a determinação dos atributos físicos e da matéria orgânica do solo, foram feitas análise estatística univariada e multivariada. A análise de variância univariada (ANOVA) foi utilizada para comparar médias dos atributos individualmente utilizando do teste de Tukey, tendo como referência a área de TPA sob floresta. Em seguida foi utilizada a análise de variância multivariada (MANOVA), através da análise fatorial e de agrupamento, a fim de encontrar significância estatística dos conjuntos dos atributos do solo que mais discriminam os ambientes, com referência ao ambiente sob floresta, obtendo como resposta atributos que sofrem maior influência sobre o uso do solo.

A adequação da análise fatorial foi feita pela medida de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), que avalia as correlações simples e parciais das variáveis, e pelo teste de esfericidade de Barlett, ao qual se pretende rejeitar a igualdade entre a matriz correlação com a identidade. A extração dos fatores foi feita pelas componentes principais, incorporando as variáveis que apresentaram comunalidades igual ou superior a cinco (5). A escolha do número de fatores a ser utilizados foi feito pelo critério de Kaiser (fatores que apresentam autovalores superior a 1). A fim de simplificar a análise fatorial, foi feita a rotação ortogonal (*Varimax*) dos fatores e representada em um plano fatorial das duas componentes.

A análise geoestatistica foi feita com base no semivariograma experimental, estimado pela equação abaixo:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \tag{4}$$

sendo $\hat{y}(h)$ o valor da semivariância para uma distância h; n(h) o número de pares envolvidos no cálculo da semivariância; $Z(x_i)$ o valor do atributo Z na posição $x_i$; e $Z(x_i + h)$ o valor do atributo Z separado por uma distância h da posição $x_i$.

A análise do grau de dependência espacial das variáveis em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), em que as propriedades do solo são consideradas com dependência espacial forte se a razão $\left[\frac{C_0}{C_0+C}\right]$ for ≤25. Se essa razão estiver entre 26% a 75%, a dependência espacial é considerada moderada, enquanto que se a propriedade do solo for maior que 75% a aproximadamente 95%, classificam-se como dependência espacial fraca.

Com base nos parâmetros dos semivariogramas experimentais dos atributos do solo, foram utilizados os semivariogramas escalonados com o objetivo de reduzi-los à mesma escala, facilitando a comparação entre resultados de diferentes variáveis (Ceddia et al., 2009). A escolha do modelo de semivariograma escalonado foi utilizada pelo menor resíduo. Os modelos utilizados nos ajustes do semivariograma escalonado foram o esférico (Equação 5) e o exponencial (Equação 6), definidos por:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1\left[\frac{3}{2}\left(\frac{h}{a}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{h}{a}\right)^3\right], se 0 < h < a \qquad (5)$$

$$C_0 + C_1, se h \geq a$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 = \left[1 - exp\left(-3\frac{h}{a}\right)\right], 0 < h < d \qquad (6)$$

em que $C_0$ é o efeito pepita; $C_0 + C_1$ é o patamar; $[(C_0/(C_0 + C_1)) \times 100]$ é o grau de dependência espacial (GDE); h é a distância de separação entre duas observações; e A é o alcance do semivariograma. O ajuste do semivariograma foi feito com base no melhor coeficiente de determinação ($R^2$) e menor soma dos quadrados dos resíduos (SQRes).

A análise estatística ANOVA e MANOVA foi feita no programa computacional StatSoft, (2004), enquanto que a análise geoestatísitca foi utilizado o programa GS+ 7.0 (ROBERTSON, 1998).

## 3 I RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística descritiva para os atributos em comparação aos usos do solo em áreas Terra Preta Arqueológica (TPA) é apresentada nos Tabelas 1, 2 e 3, para as respectivas camadas 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m.

Os coeficientes de assimetria apresentaram valores próximos à zero, com exceção das classes de agregados <1,00 mm para o uso de TPA sob pastagem, nas camadas 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m. Os resultados tendem a apresentar valores simétricos nos ambientes em estudo. Já o coeficiente de curtose, boa parte dos atributos apresentaram uma distribuição platicúrtica (distribuição mais achatada que a distribuição normal).

As medidas de média e mediana, devido aos dados apresentar uma distribuição simétrica, ambos mostraram valores muito próximo para todos os atributos e em suas respectivas camadas, o que justifica distribuições normais ou aproximadamente normais.

Pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, mostraram-se variações entre os ambientes e propriedades nas respectivas camadas. Mesmo assim, erros de análises em relação aos testes de hipóteses são mínimos, quando avaliados em relação a uma distribuição normal. Por outro lado, a normalidade dos dados não é um pressuposto necessário para a aplicação de técnica geoestatística, mas sim que a distribuição não apresente caudas muito alongadas, o que poderia comprometer a análise (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989; CRESSIE, 1991).

Os atributos granulométricos apresentaram diferença significativa entre os ambientes estudados e com dominância na fração de areia, em contraste a resultados encontrados por Oliveira et al. (2015a), que evidenciou áreas de TPA sob cultivo com dominância na fração silte para a camada de 0,00-0,20 m. A área de TPA sob floresta evidenciou menores teores de areia para as três profundidades, e maiores teores de silte e argila, com exceção da fração argila na camada 0,10-0,20 m, obtendo com isso menor valor.

No estudo de gênese do solo, a fração silte passa a constituir como o indicador pela a ação de intemperismo, o que pudemos constatar solos de formação mais jovens que os propostos por Oliveira et al. (2015a).

Por outro lado, os maiores teores de areia sob as áreas de feijão guandu e pastagem se devem provavelmente a fortes chuvas que promovem grandes enxurradas, por essas apresentarem áreas mais abertas, com impacto das gotas de chuva sobre o solo em relação à área sob floresta. A presença de cobertura no solo atua na interceptação das gotas de chuva e evita o desprendimento das partículas do solo. Chuvas de grande intensidade causam maior desagregação do solo e, normalmente, originam escoamento superficial, sendo as partículas menores de solo são mais fáceis de serem transportadas (VOLK & COGO, 2009).

Interações significativas entre os sistemas de uso do solo foram verificadas para as propriedades físicas Ds, MaP, MiP, VTP e Ug, indicando que o uso do solo pouco afetou nas variações dessas propriedades (Tabelas 1, 2 e 3), para a camada entre 0,00-0,05 m, mas houve mudanças de comportamento aos demais atributos e em camadas subsequentes, com exceção do VTP, CO e EC na camada 0,10-0,20 m. Por outro lado, na camada de 0,00-0,05 m, o solo mantido sob pastagem apresentou-se menos compactada, com menor valor de Ds, além de maiores valores do VTP em relação ao TPA sob floresta e feijão guandu. Mesmo assim, a Ds não diferiu muito em relação ao sistema de uso do solo dentro da mesma camada (0,00-0,05 m), mas houve alterações para as camadas 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, com menor valor de Ds para o uso sob floresta, não havendo diferença entre os sistemas de uso sob feijão guandu e pastagem (Tabelas 1, 2 e 3).

A ausência de práticas agressivas ao solo em florestas naturais afeta diretamente a estrutura do solo, com baixos valores de Ds (CALONEGO et al., 2012). Além disso, os mesmos autores afirmam que tanto os altos valores da MO quanto os elevados valores do VTP reduzem também os valores de Ds. Resultados semelhantes foram encontrados para

solos não antropogênicos sob o horizonte A (CAMPOS et al., 2012; SANTOS et al., 2013), mas que apresentaram valores muito baixo em solos antropogênicos (em TPA). Esse fato pode estar relacionado ao tipo de solo, com características físicas que diferem em ralação aos perfis do solo para determinados atributos. Em trabalho realizado por Santos et al. (2011), os autores verificaram valores semelhantes da Ds em TPA com perfil de Neossolo Litólico sob o uso de pastagem, mas com valores baixos em comparação com outros perfis.

| Estatística Descritiva | Ds | MaP | MiP | VTP | Ug | RP | CO | EC | DMG | DMP | Classes % | | | Areia | Silte | Argila |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | mg m$^{-3}$ | % | | | | MPa | g kg$^{-3}$ | t ha$^{-1}$ | mm | | >2,00 g kg$^{-1}$ | 2,00-1,00 | <1,00 | | | |
| **Floresta** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Média | 1,27 A | 26,50 A | 30,90 A | 57,40 A | 24,40 A | 0,40 B | 22,96 B | 145,80 B | 2,74 A | 3,10 A | 91,19 A | 1,29 B | 8,05 B | 701,10 B | 203,40 A | 95,50 A |
| Mediana | 1,27 | 26,10 | 30,70 | 57,50 | 24,30 | 0,37 | 22,17 | 141,70 | 2,76 | 3,10 | 91,17 | 1,17 | 7,43 | 697,30 | 199,50 | 94,60 |
| DP | 0,08 | 3,59 | 2,19 | 3,30 | 2,40 | 0,13 | 4,50 | 25,80 | 0,26 | 0,12 | 3,96 | 0,73 | 3,88 | 27,40 | 27,60 | 16,02 |
| CV (%) | 6,30 | 13,55 | 7,09 | 5,75 | 9,84 | 32,50 | 19,60 | 17,82 | 9,49 | 3,87 | 4,34 | 56,59 | 48,20 | 3,91 | 13,57 | 16,77 |
| Assimetria | 0,05 | 0,11 | 0,16 | -0,03 | 0,54 | 0,46 | 0,29 | 0,40 | -0,58 | -0,57 | -0,56 | 0,65 | 0,82 | -0,15 | -0,05 | -0,03 |
| Curtose | 0,17 | -0,16 | 0,00 | 0,02 | 0,68 | -0,02 | -0,53 | -0,02 | -0,22 | -0,29 | -0,29 | -0,21 | 0,35 | 0,00 | -0,38 | -0,50 |
| K-S | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,03 | 0,20 | 0,20 | 0,06 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| **Feijão Guandu** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Média | 1,26 A | 26,40 A | 30,80 A | 57,20 A | 24,90 A | 0,49 A | 33,93 A | 213,76 A | 2,24 B | 2,80 B | 80,86 B | 2,58 A | 17,36 A | 732,50 A | 194,90 A | 72,60 B |
| Mediana | 1,26 | 27,00 | 30,80 | 57,02 | 24,70 | 0,44 | 33,02 | 210,30 | 2,29 | 2,90 | 83,55 | 2,54 | 14,58 | 734,60 | 192,50 | 72,40 |
| DP | 0,14 | 5,40 | 3,30 | 4,70 | 3,80 | 0,21 | 7,34 | 40,90 | 0,58 | 0,37 | 12,26 | 1,58 | 11,41 | 39,40 | 35,21 | 18,50 |
| CV (%) | 11,11 | 20,45 | 10,71 | 8,22 | 15,26 | 42,86 | 21,63 | 19,35 | 25,89 | 13,21 | 15,16 | 61,24 | 65,73 | 5,38 | 18,07 | 25,48 |
| Assimetria | -0,04 | -0,36 | 0,19 | 0,12 | 0,40 | 0,78 | 0,04 | -0,14 | -0,24 | -0,63 | -0,60 | 0,66 | 0,59 | -0,24 | 0,22 | 0,16 |
| Curtose | -0,43 | -0,27 | -0,22 | -0,22 | -0,08 | 0,30 | -0,33 | 0,00 | -1,09 | -0,40 | -0,51 | -0,04 | -0,55 | -0,41 | -0,14 | -0,15 |
| K-S | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,01 | 0,20 | 0,20 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,20 | 0,00 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| **Pastagem** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Média | 1,22 A | 27,70 A | 30,90 A | 58,60 A | 25,30 A | 0,49 A | 22,77 B | 138,90 B | 2,64 A | 3,10 A | 90,86 A | 0,93 C | 8,47 B | 741,40 A | 180,50 B | 78,10 B |
| Mediana | 1,22 | 28,30 | 31,10 | 58,30 | 25,30 | 0,44 | 22,51 | 133,30 | 2,65 | 3,11 | 91,85 | 0,80 | 7,34 | 745,60 | 180,40 | 78,00 |
| DP | 0,10 | 6,60 | 3,60 | 4,50 | 2,60 | 0,22 | 4,25 | 28,40 | 0,26 | 0,13 | 4,33 | 0,56 | 4,28 | 29,40 | 34,30 | 18,97 |
| CV (%) | 8,20 | 23,83 | 11,65 | 7,68 | 10,28 | 44,90 | 18,66 | 20,42 | 9,85 | 4,19 | 4,77 | 60,22 | 50,53 | 3,97 | 19,00 | 24,29 |
| Assimetria | 0,06 | -0,22 | 0,40 | 0,16 | 0,12 | 0,68 | 0,27 | 0,49 | -0,48 | -1,00 | -1,00 | 0,60 | 1,17 | -0,42 | -0,25 | 0,08 |
| Curtose | -0,16 | -0,36 | -0,40 | -0,72 | -0,51 | 0,01 | -0,35 | -0,02 | -0,18 | 0,67 | 0,65 | -0,51 | 0,85 | 0,22 | -0,06 | -0,25 |
| K-S | 0,20 | 0,20 | 0,01 | 0,20 | 0,20 | 0,06 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,01 | 0,08 | 0,20 | 0,20 |

Dp: desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%); K-S: teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov; Ds: densidade do solo; MaP: macroporosidade; MiP: microporosidade; VTP: volume total de poros; Ug: umidade gravimétrica; RP: resistência do solo à penetração; CO: carbono orgânico; EC: estoque de carbono; DMG: diâmetro médio geométrico; DMP: diâmetro médio ponderado. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 1. Teste de média e estatística descritiva dos atributos do solo na profundidade de 0,00-0,05 m para as áreas com diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

| Estatística Descritiva | Ds | MaP | MiP | VTP | Ug | RP | CO | EC | DMG | DMP | Classes % | | | Areia | Silte | Argila |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | mg m$^{-3}$ | % | | | | Mpa | g kg$^{-3}$ | t ha$^{-1}$ | Mm | | >2,00 | 2,00-1,00 | <1,00 | g kg$^{-1}$ | | |
| **Floresta** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Média | 1,36 B | 23,31 A | 28,00 C | 51,32 A | 20,59 C | 0,40 C | 23,28 A | 158,30 A | 2,06 B | 2,66 B | 75,95 B | 4,54 A | 19,51 A | 701,34 C | 195,89 A | 102,77 A |
| Mediana | 1,37 | 23,48 | 28,08 | 51,16 | 20,70 | 0,39 | 24,00 | 161,47 | 2,09 | 2,75 | 79,04 | 3,97 | 17,40 | 698,40 | 195,05 | 103,21 |
| DP | 0,07 | 2,95 | 2,11 | 3,04 | 2,09 | 0,12 | 4,97 | 30,29 | 0,45 | 0,34 | 11,70 | 2,57 | 9,54 | 39,64 | 36,31 | 14,71 |
| CV (%) | 5,29 | 12,66 | 7,54 | 5,92 | 10,15 | 30,00 | 21,35 | 19,18 | 21,84 | 12,78 | 15,40 | 56,61 | 48,90 | 5,65 | 18,54 | 14,31 |
| Assimetria | -0,13 | -0,05 | 0,15 | -0,16 | 0,00 | 0,12 | 0,02 | 0,03 | -0,29 | -0,55 | -0,52 | 0,72 | 0,65 | 0,25 | -0,13 | -0,32 |
| Curtose | 0,26 | -0,02 | -0,46 | -0,51 | -0,56 | -0,05 | -0,23 | -0,37 | -0,87 | -0,80 | 0,87 | -0,31 | -0,60 | -0,33 | -0,42 | 0,06 |
| K-S | 0,20 | 0,09 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,07 | 0,07 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| **Feijão Guandu** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Média | 1,43 A | 19,54 B | 31,58 B | 51,13 A | 22,25 B | 0,66 B | 17,55 B | 125,48 B | 2,27 A | 2,80 A | 80,70 A | 3,40 B | 15,93 B | 768,73 A | 145,22 C | 86,07 B |
| Mediana | 1,45 | 19,29 | 31,49 | 50,37 | 21,48 | 0,64 | 17,42 | 123,29 | 2,36 | 2,90 | 84,31 | 2,79 | 13,28 | 773,95 | 150,07 | 82,98 |
| DP | 0,10 | 4,28 | 3,41 | 3,83 | 3,16 | 0,20 | 4,75 | 32,41 | 0,46 | 0,32 | 10,94 | 2,28 | 9,06 | 39,39 | 40,39 | 25,20 |
| CV (%) | 6,99 | 21,90 | 10,80 | 7,49 | 14,20 | 30,30 | 27,07 | 26,10 | 20,26 | 11,43 | 13,56 | 67,06 | 56,87 | 5,12 | 27,81 | 29,28 |
| Assimetria | -0,58 | 0,36 | 0,20 | 0,62 | 0,59 | 0,54 | 0,12 | 0,10 | -0,47 | -0,82 | -0,78 | 0,84 | 0,94 | -0,28 | -0,11 | 0,22 |
| Curtose | 0,09 | -0,04 | -0,72 | 0,11 | -0,29 | 0,03 | 0,24 | 0,43 | -0,61 | -0,29 | -0,40 | -0,17 | 0,03 | -0,28 | 0,16 | -0,41 |
| K-S | 0,01 | 0,09 | 0,20 | 0,19 | 0,03 | 0,20 | 0,05 | 0,20 | 0,08 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,20 | 0,20 |
| **Pastagem** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Média | 1,41 A | 15,75 C | 33,81 A | 49,36 B | 23,97 A | 0,77 A | 21,90 A | 154,39 A | 2,32 AB | 2,87 A | 83,35 A | 2,21 C | 14,44 B | 745,19 B | 173,70 B | 81,11 B |
| Mediana | 1,41 | 15,90 | 33,61 | 49,31 | 24,10 | 0,72 | 22,80 | 156,24 | 2,36 | 2,93 | 85,39 | 1,95 | 12,69 | 740,37 | 171,99 | 78,80 |
| DP | 0,09 | 4,50 | 3,14 | 3,54 | 2,75 | 0,24 | 5,95 | 42,52 | 0,50 | 0,31 | 10,53 | 1,50 | 9,02 | 27,42 | 31,50 | 17,05 |
| CV (%) | 6,38 | 28,57 | 9,29 | 7,17 | 11,47 | 31,17 | 27,17 | 27,61 | 21,55 | 10,80 | 12,63 | 67,87 | 62,49 | 3,68 | 18,13 | 21,02 |
| Assimetria | 0,00 | 0,07 | 0,11 | 0,43 | 0,04 | 0,71 | -0,12 | 0,03 | -0,47 | -0,97 | -0,96 | 0,91 | 1,00 | 0,25 | 0,05 | 0,63 |
| Curtose | -0,25 | -0,37 | -0,17 | -0,07 | -0,85 | -0,23 | -0,95 | -0,84 | -0,60 | 0,39 | 0,38 | 0,46 | 0,48 | -0,13 | -0,89 | -0,07 |
| K-S | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,04 | 0,02 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 0,00 | 0,20 | 0,01 | 0,20 |

Dp: desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%); K-S: teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov; Ds: densidade do solo; MaP: macroporosidade; MiP: microporosidade; VTP: volume total de poros; Ug: umidade gravimétrica; RP: resistência do solo à penetração; CO: carbono orgânico; EC: estoque de carbono; DMG: diâmetro médio geométrico; DMP: diâmetro médio ponderado. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 2. Teste de média e estatística descritiva dos atributos do solo na profundidade de 0,05-0,10 m para as áreas com diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

| Estatística Descritiva | Ds | MaP | MiP | VTP | Ug | RP | CO | EC | DMG | DMP | Classes % >2,00 | 2,00-1,00 | <1,00 | Areia | Silte | Argila |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | mg m$^{-3}$ | % | | | | MPa | g kg$^{-3}$ | t ha$^{-1}$ | Mm | | | | | g kg$^{-1}$ | | |
| **Floresta** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Média | 1,37 B | 22,29 A | 28,20 C | 50,49 A | 20,74 B | 0,38 C | 18,07 A | 247,56 A | 1,34 B | 1,98 B | 52,37 B | 8,76 A | 38,87 A | 718,74 B | 194,02 A | 87,24 B |
| Mediana | 1,37 | 22,30 | 28,35 | 50,62 | 20,62 | 0,37 | 17,69 | 247,40 | 1,26 | 2,00 | 53,56 | 8,20 | 38,67 | 726,16 | 191,57 | 86,59 |
| DP | 0,09 | 3,11 | 2,66 | 3,77 | 2,94 | 0,10 | 6,53 | 82,43 | 0,47 | 0,51 | 17,22 | 3,32 | 15,25 | 37,79 | 37,79 | 13,16 |
| CV (%) | 6,57 | 13,95 | 9,43 | 7,47 | 14,18 | 26,32 | 36,14 | 33,74 | 35,07 | 25,76 | 32,88 | 37,90 | 39,23 | 5,26 | 19,48 | 15,08 |
| Assimetria | -0,22 | 0,10 | 0,17 | -0,14 | 0,18 | 0,00 | -0,12 | -0,17 | 0,37 | -0,19 | -0,11 | 0,47 | 0,35 | -0,59 | 0,22 | 0,16 |
| Curtose | -0,50 | 0,00 | -0,94 | -0,49 | -0,99 | -0,66 | -0,68 | -0,44 | -0,43 | -0,64 | -0,75 | 0,00 | -0,41 | -0,21 | -0,75 | -0,33 |
| K-S | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,08 | 0,20 | 0,08 | 0,20 | 0,00 | 0,20 | 0,20 | 0,03 | 0,20 | 0,03 | 0,20 | 0,20 |
| **Feijão** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Média | 1,48 A | 18,58 B | 31,28 B | 49,86 A | 21,26 AB | 0,55 B | 17,38 A | 257,22 A | 1,40 AB | 2,02 B | 54,20 B | 7,73 B | 38,12 AB | 764,95 A | 137,64 B | 97,41 A |
| Mediana | 1,47 | 18,29 | 30,19 | 49,86 | 20,69 | 0,53 | 14,82 | 217,80 | 1,31 | 2,01 | 53,08 | 7,73 | 37,44 | 775,05 | 130,99 | 101,64 |
| DP | 0,09 | 4,82 | 4,11 | 2,91 | 3,37 | 0,18 | 8,42 | 119,02 | 0,53 | 0,56 | 18,97 | 3,10 | 16,74 | 34,20 | 41,27 | 23,12 |
| CV (%) | 6,08 | 25,94 | 13,14 | 5,84 | 15,85 | 32,73 | 48,45 | 46,77 | 37,86 | 27,72 | 35,00 | 40,10 | 43,91 | 4,47 | 29,98 | 23,73 |
| Assimetria | 0,17 | 0,06 | 0,31 | -0,22 | 0,63 | 0,36 | 0,76 | 0,75 | 0,34 | -0,22 | -0,16 | 0,47 | 0,36 | -0,80 | 0,65 | -0,40 |
| Curtose | -0,26 | -0,83 | -0,23 | -0,76 | -0,09 | -0,27 | -0,27 | -0,27 | -0,54 | -0,73 | -0,82 | 0,35 | -0,52 | 0,31 | -0,06 | -0,12 |
| K-S | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,17 | 0,20 | 0,00 | 0,00 | 0,20 | 0,20 | 0,18 | 0,20 | 0,20 | 0,00 | 0,01 | 0,20 |
| **Pastagem** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Média | 1,46 A | 16,29 C | 32,88 A | 49,17 A | 22,61 A | 0,65 A | 18,35 A | 267,91 A | 1,55 A | 2,24 A | 61,92 A | 5,77 C | 32,31 B | 762,22 A | 146,61 B | 91,17 B |
| Mediana | 1,47 | 16,23 | 32,85 | 49,34 | 22,61 | 0,65 | 18,52 | 270,28 | 1,45 | 2,25 | 62,11 | 5,97 | 32,18 | 760,33 | 146,67 | 94,08 |
| DP | 0,08 | 3,92 | 2,95 | 3,68 | 2,63 | 0,18 | 4,83 | 65,28 | 0,61 | 0,58 | 19,35 | 3,26 | 16,75 | 27,85 | 32,63 | 21,04 |
| CV (%) | 5,48 | 24,06 | 8,97 | 7,48 | 11,63 | 27,69 | 26,32 | 24,59 | 39,35 | 25,89 | 31,25 | 56,50 | 51,84 | 3,65 | 22,26 | 23,08 |
| Assimetria | -0,06 | 0,11 | 0,39 | 0,00 | 0,17 | 0,32 | 0,04 | 0,11 | 0,27 | -0,39 | -0,34 | 0,06 | 0,48 | 0,26 | 0,06 | -0,41 |
| Curtose | -0,51 | -0,62 | -0,08 | -0,23 | -0,43 | 0,13 | -0,31 | 0,00 | -0,96 | -0,48 | -0,56 | -1,12 | -0,31 | -0,39 | -0,48 | -0,17 |
| K-S | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,06 | 0,17 | 0,20 | 0,19 | 0,01 | 0,17 | 0,20 | 0,04 |

Dp: desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%); K-S: teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov; Ds: densidade do solo; MaP: macroporosidade; MiP: microporosidade; VTP: volume total de poros; Ug: umidade gravimétrica; RP: resistência do solo à penetração; CO: carbono orgânico; EC: estoque de carbono; DMG: diâmetro médio geométrico; DMP: diâmetro médio ponderado. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 3. Teste de média e estatística descritiva dos atributos do solo na profundidade de 0,10-0,20 m para as áreas com diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

Também não houve diferença significativas entre a MaP com os sistemas de uso na camada entre 0,00-0,05 m, que apresentou comportamento semelhante da MiP. No entanto, nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, observou-se maiores valores para a

MaP sob o uso de floresta natural e de MiP sob o uso de pastagem, corroborando assim com os valores do VTP para os sistemas de uso do solo, que apresentaram maiores valores em floresta, apesar de haver diferença significativa apenas na camada entre 0,05-0,10 m, com menor valor no sistema de uso sob pastagem.

Esses resultados demonstram que os sistemas de uso do solo contribuem efetivamente para a melhora das condições físicas do solo, promovendo redução da Ds em relação à área de floresta. Resultados semelhantes também foram verificados por Cunha et al. (2011), em avaliar os atributos físicos de solo cultivado com feijão e milho orgânicos sob a influência das plantas de cobertura, que apresentaram, em solo sob mata nativa, menores valores de Ds e MiP e maiores valores de MaP e VTP. Para os autores, essas condições foram propícias devido ao solo não sofrer o trânsito de máquinas e equipamentos ou animais.

Em relação à resistência do solo à penetração (RP), houve diferença significativa sob os sistemas de uso do solo para as três camadas, cujos menores valores da RP estão associados ao uso sob floresta. Esses resultados corroboram também para o baixo valor da Ug e Ds sob a mesma área, apesar de não haver diferença significativa de Ug em relação aos sistemas de uso na camada 0,00-0,05 m. Em estudo sobre a relação entre a umidade do solo e a resistência à penetração de um Argissolo Amarelo distrocoeso na região do Recôncavo da Bahia, Silveira et al. (2010) constataram que solos com baixo conteúdo de água, apresentam partículas mais próximas e difíceis de serem separadas, com o aumento da RP. O solo sob floresta apresentou valores de RP menores que 0,50 MPa nos 0,20 m de profundidade, diferindo dos solos manejados, que apresentaram solos menos compactados apenas nos primeiros 0,05 m de profundidade. Mesmo assim, esses valores ainda são muito baixos se considerarmos os valores limites definidos do Tavares Filho e Tessier (2009) para solos compactados (RP de 2,0 MPa). Em solos de TPA sob o uso de pastagem, verificou-se valores acima de 2,0 MPa para uma camada de 0,0-0,05 mm (SOARES et al., 2015) que, segundo os autores, justifica-se pela compactação do solo devido ao pisoteio animal.

Tanto o CO quanto o EC (Tabelas 1, 2 e 3) houve alterações para os respectivos usos do solo, com maiores valores sob o uso de feijão Guandu na camada 0,00-0,05 m, passando a ter menor valor na camada 0,05-0,10 m, não havendo diferença estatística entre os usos na camada 0,10-0,20 m. Os valores altos de CO sob feijão Guandu na camada 0,00-0,05 m devem estar associados à elevada cobertura vegetal, com mais de oito meses de plantio sem sofrer práticas intensivas no solo e trânsitos de animais.

Altas concentrações de cobertura vegetal verificadas *in loco* sob o uso do feijão Guandu pode ter favorecido aos maiores teores de CO. Esse resultado difere do proposto por Rossetti et al. (2015), ao determinar o efeito do sistema plantio direto sobre o estoque de carbono e atributos físicos do solo cultivados com soja e milho, e comparação com a mata nativa, identificaram maior concentração de MO sob mata nativa em relação aos

demais tratamentos, ao qual os autores associam à deposição contínua de serrapilheira, além da ausência de ação antrópica.

Sob os respectivos usos do solo, o DMG e DMP diferiram estatisticamente, dando maiores valores sob o uso de floresta para a camada 0,00-0,05 m, e sob o uso de pastagem para as camadas de 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m. No entanto, não foram confirmadas correlações significativas entre o DMG/DMP com os atributos CO e EC nas camadas de 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m, com exceção sob o uso de feijão Guandu na camada 0,05-0,10 m, que obteve correlações positivas para o CO (0,25 e 0,27, respectivamente).

Por outro lado, na camada 0,10-0,20 m, houve correlações significativas entre o DMG/DMP com o CO e EC, com valores de coeficiente de correlação definidos em: 0,39/0,39 e 0,38/0,38, respectivamente, para o uso sob floresta; de 0,36/0,36 e 0,35/0,35, respectivamente, sob o uso sob pastagem; e de 0,30/0,30 e 0,27/0,27, respectivamente, sob o uso de feijão Guandu. Correlações positivas do DMG e DMP com o carbono orgânico foram verificadas por Rozane et al. (2010), indicando sua importância na agregação do solo. Esses resultados também corroboram com os Matos et al. (2008), quando avaliaram a estabilidade de agregados sobre o impacto da adubação orgânica e mineral sobre o solo. O fato de haver perda de correlação dos atributos DMG e DMP com o CO e EC nas camadas mais superficiais, pode ser explicado por práticas como a aração, gradagem e o pisoteio do gado, que promovem a desestruturação dos agregados e a oxidação da matéria orgânica, além do revolvimento do solo para camadas mais profundas.

Na análise multivariada, foi possível observar os atributos do solo que sofreu maior alteração quando ao uso do solo, em comparação a área sob floresta. A adequação da análise fatorial mostrou-se significativo (KMO igual a 0,78 e $p<0,05$ para o teste de esfericidade de Barlett) para os atributos avaliados. Na análise de componentes principais (ACP), o número de fatores a ser extraído foi estabelecido de forma a explicar acima de 70% da variância total dos dados (Tabela 4 e Figura 2), que apresentaram autovalores da matriz de covariância superior a um (1) (Manly, 2008), com 4,71 na CP1 e 3,80 na CP2. Do percentual da variância explicada, observou-se que a CP1 é responsável por 42,79% da variância total, enquanto que a CP2 é responsável por 34,54%.

| Atributos | Variância Comum | Fatores | |
|---|---|---|---|
| | | PC1 | PC2 |
| Ds | 0,79 | -0,15 | -0,86* |
| VTP | 0,75 | 0,09 | 0,80* |
| Ug | 0,61 | 0,25 | 0,74* |
| CO | 0,44 | 0,19 | 0,67* |
| Areia | 0,88 | 0,08 | -0,82* |
| Silte | 0,88 | 0,03 | 0,85* |
| DMG | 0,91 | 0,95* | 0,11 |
| DMP | 1,00 | 0,99* | 0,09 |
| >2,00 mm | 1,00 | 0,99* | 0,08 |
| 2,00-1,00 mm | 0,77 | -0,88* | 0,06 |
| <1,00 mm | 0,99 | -0,97* | -0,11 |
| | Variância explicada (%) | 42,79 | 34,54 |

Ds: densidade do solo; MaP: macroporosidade; MiP: microporosidade; VTP: volume total de poros; Ug: umidade gravimétrica; RP: resistência do solo à penetração; CO: carbono orgânico; EC: estoque de carbono; DMG: diâmetro médio geométrico; DMP: diâmetro médio ponderado; >2,00 mm (%): classe de agregados maior que 2,00 milímetros; 2,00-1,00 mm: classe de agregados entre 2,00 e 1,00 milímetros; <1,00 mm (%)= classe de agregados menor que 1 milímetros.

Tabela 4. Correlação entre cada componente principal e variáveis analisadas e análise fatorial dos atributos do solo com os fatores rotacionados (Varimax) (Fator 1 e 2) correspondentes aos ambientes estudados, na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

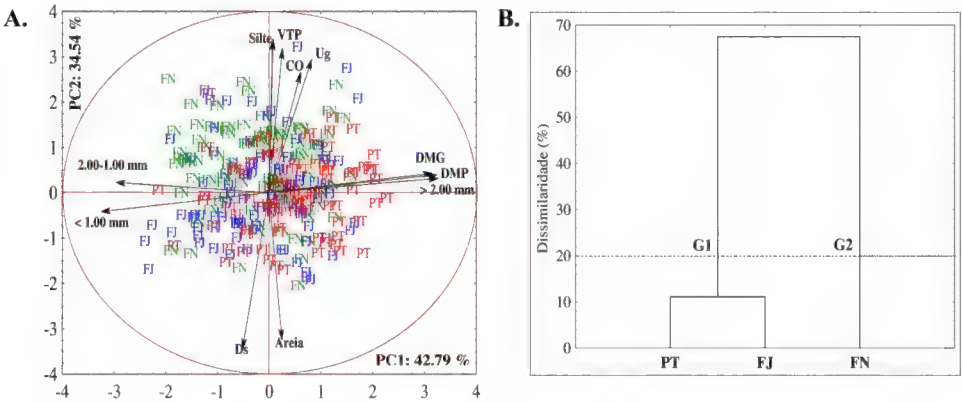



Figura 1. (A) Plano fatorial dos atributos do solo em áreas de Terra Preta Arqueológica sob diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas. Valores padronizados de tal forma que a média é zero e as distancias entre os escores é medido pelo desvio padrão. (B) Dendrograma de agrupamentos dos usos do solo em Terra Preta Arqueológica com linha de corte de 20%, de acordo com os atributos do solo com cargas fatoriais superiores a 0,70. FN: floresta; FJ: feijão guandu; PT: pastagem.

Tanto a primeira quanto a segunda fator (Tabela 4) tem percentual de explicação para as características estruturais, mecânica e granulométrica do solo. Assim, a discriminação entre os ambientes diz respeito a essas características, com CP1 representando as características de estabilidade dos agredados do solo (DMG, DMP e classes de agregados >2,00 mm, 2,00-1,00 mm e <1,00 mm), enquanto a CP2 às características estruturais do solo, textura e do carbono orgânico (Ds, VTP, Ug, CO, teor de areia e silte).

Na Figura 2A está representado o plano fatorial da distribuição dos escores das diferentes áreas estudadas e da disposição das cargas fatoriais dos atributos do solo formado pelos PC1 e PC2. Observa-se maior adensamento dos escores da floresta no primeiro e segundo quadrante da Figura 2A, o que discrimina a área sob floresta que obtiveram valores dos atributos Ds, VTP, Ug, CO, teor de areia e silte acima da média. Por outro lado, as áreas sob feijão Guandu e pastagem apresentam-se mais distribuído entre os primeiros, terceiro e o quarto quadrante, com atributos que apresentam caracterizados estruturais acima da média, assim como características mecânicas, granulométricas e carbono orgânico abaixo da média.

Utilizando os atributos na análise de agrupamentos (Figura 2B), e considerando a linha de corte 20% da medida de dissimilaridade, observa-se a formação de dois grupos distintos, com as áreas sob feijão Guandu e pastagem consideradas estatisticamente iguais no que diz respeito ao comportamento dos atributos físicos e carbono orgânico do solo, que é confirmada pela análise fatorial.

Os atributos apresentaram coeficiente de variação (CV) com valores variando de baixo, moderara e alto (Tabelas 1, 2 e 3), segundo os critérios de Warrick e Nielsen (1980), e isso como sendo um indicativo da heterogeneidade dos dados. Verificou-se que em todas as áreas estudadas, e em suas respectivas profundidades, os atributos apresentaram predominância de CV baixo a moderado, corroborando com resultados de Aquino et al. (2015), que avaliaram os atributos físicos em ambientes utilizando o semivariograma escalonado. Também foram verificados comportamentos semelhantes em outros trabalhos com variabilidade espacial dos atributos físicos do solo (Oliveira et al., 2015a; Santos et al., 2012).

Os atributos Ds, MiP, VTP, Ug e teor de areia, apresentaram CV baixo (até 11,63%), com exceção a MiP e Ug, que mostraram comportamento de CV mediano sob o uso do feijão Guandu (na camada 0,10-0,20 m para a MiP e nas três camadas para Ug), sendo o último sob o uso de floresta na camada 0,10-0,20 m. Os atributos DMG, DMP e classe de agregados >2,00 mm, apresentaram CV de baixo à mediano nas duas primeiras camadas, sob todos os usos do solo, e alta na camada subsequente (0,10-0,20 m), com exceção do DMG na área de feijão Guandu, que mostrou um CV alto na camada 0,00-0,05 m. Os demais atributos apresentaram CV de mediana a alta em todos os usos e camadas adotadas, sendo a RP com CV todas altas, com valores entre 30% a 44,90%. Em geral, a área sob floresta foi o que apresentou mais homogeneidade (CV = 17,93%), seguido

de pastagem (CV = 21,31%), ambos com CV mediano, enquanto que na área sob feijão Guandu, o coeficiente de variação foi de 23,99%, com alta variabilidade, sendo mais heterogêneo quando comparadas às outras áreas.

Dada a comportamento do CV para os atributos do solo, este pode comparar a variabilidade dos atributos com unidades diferentes. No entanto, para a variabilidade espacial, o semivariograma escalonado foi utilizado, o que observou uma variabilidade espacial na maioria dos atributos, com modelo de ajuste exponencial e esférica (Figuras 3, 4 e 5).

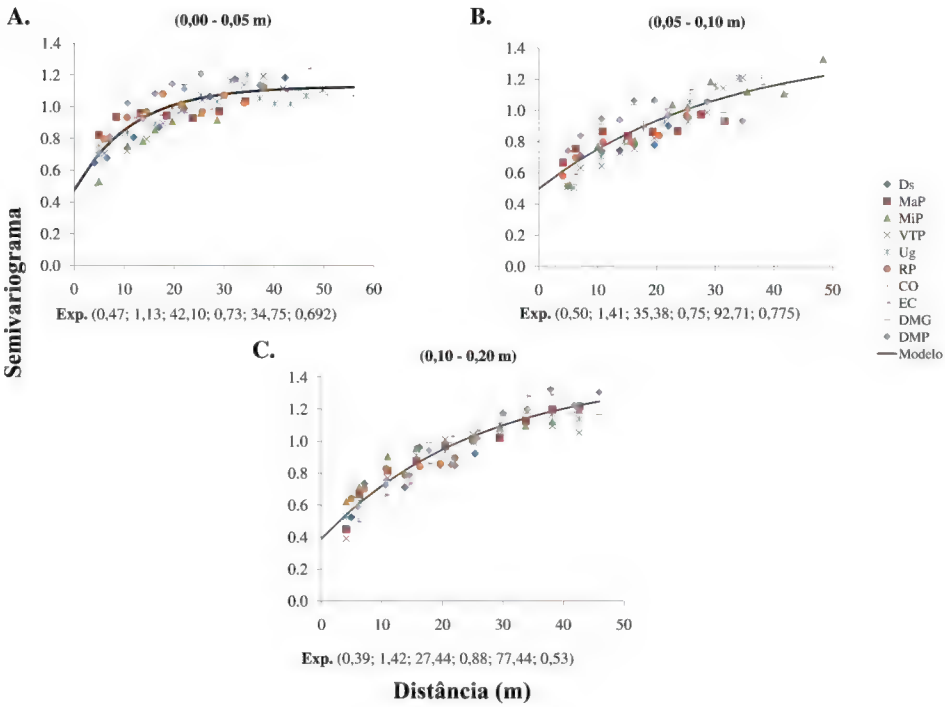



Figura 2. Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonados ajustados aos atributos do solo em áreas de TPA sob floresta na região de Novo Aripuanã, Amazonas. [modelo (efeito pepita; patamar; GDE; R2; alcance; resíduo)]. Esf.: Esférico; Exp.: exponencial; GDE: grau de dependência espacial; $R^2$: coeficiente de determinação.

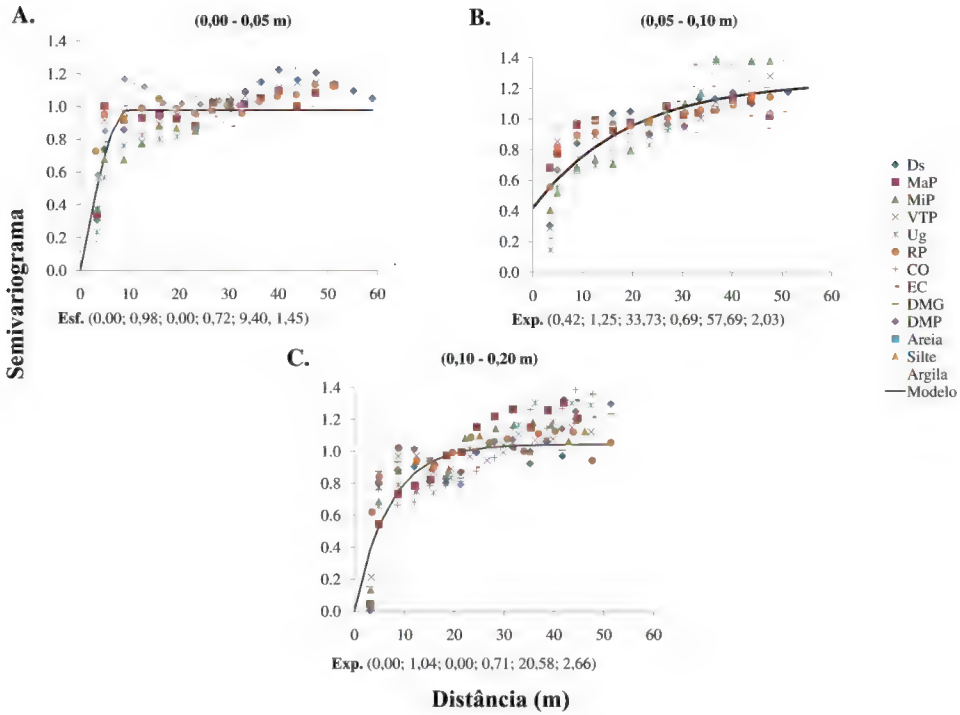



Figura 3. Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonados ajustados aos atributos do solo em áreas de TPA sob feijão na região de Novo Aripuanã, Amazonas. [modelo (efeito pepita; patamar; GDE; R2; alcance; resíduo)]. Esf.: Esférico; Exp.: exponencial; GDE: grau de dependência espacial; $R^2$: coeficiente de determinação.

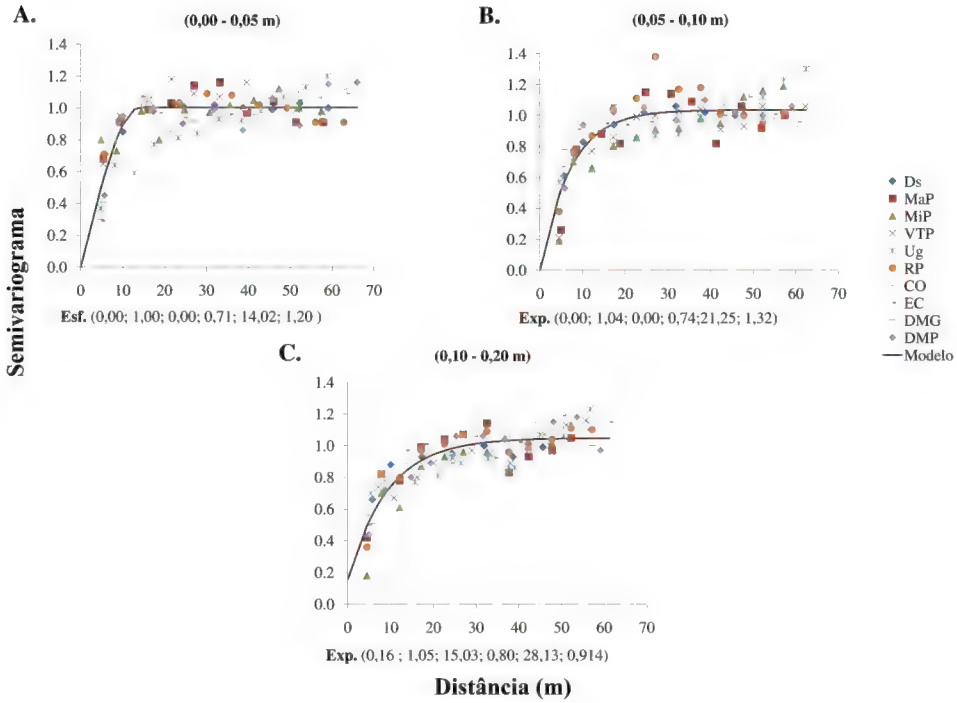



Figura 4. Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonados ajustados aos atributos do solo em áreas de TPA sob pastagem na região de Novo Aripuanã, Amazonas. [modelo (efeito pepita; patamar; GDE; R2; alcance; resíduo)]. Esf.: Esférico; Exp.: Exponencial; GDE: grau de dependência espacial; $R^2$: coeficiente de determinação.

Houve mudança de comportamento dos padrões de variabilidade espacial em comparação a área de floresta. O grau de dependência espacial, segundo a classificação de Cambardella et al. (1994), foram fortes em áreas sob feijão Guandu e pastagem nas camadas adotadas (Figuras 4 e 5), com exceção a área de feijão Guandu na camada 0,05-0,10 m, que apresentaram dependência espacial moderada. Por outro lado, a área sob floresta apresentou dependência moderara (Figura 3). Todos esses resultados estão de acordo com os trabalhos de Aquino et al. (2015) e Oliveira et al. (2015a), em se tratando de variabilidade dos atributos do solo em áreas de TPA ou solos adjacentes.

Com base aos ajustes do modelo do semivariograma escalonado, verificou-se comportamento semelhante dos atributos avaliados em relação à área de floresta com as demais áreas. Houve predominância dos modelos exponenciais (Figuras 3, 4 e 5) para o ajuste do semivariograma escalonado, levando em consideração o menor resíduo. O Modelo esférico foi ajustado apenas nas áreas de feijão Guandu e pastagem para a camada de 0,00-0,05 m. Esse resultado corrobora com outras pesquisas, quando avaliado os atributos físicos e químicos em áreas de TPA sob cultivo, onde foram verificados modelos esféricos nas camadas de 0,00-0,10 m e de 0,00-0,20 m, respectivamente (Aquino et al., 2015;

Oliveira et al., 2015a). O modelo exponencial mostra um comportamento dos atributos com variações mais erráticas (menos contínuas), quando comparadas aos modelos de ajuste esférico, por este apresentar uma variabilidade mais contínua (Isaaks e Srivastava, 1989). Assim, os modelos tiveram bons ajustes ao semivariograma escalonado, com coeficientes de determinação ($R^2$) variando entre 0,69 em área de feijão Guandu na camada de 0,05-0,10 m, a 0,88 em área de floresta na camada de 0,10-0,20 m.

Avaliando os valores do alcance ajustado (Figuras 3, 4 e 5), observou-se que em áreas sob feijão Guandu, com coletas de solos em uma malha com distância mínima de quatro metros, houve menor alcance para a independência da variância entre os pares (patamar), com relação aos atributos do solo, com valores de 9,40 m e 20,58 m para as camadas de 0,00-0,05 m e 0,10-0,20 m, respectivamente (com exceção à camada de 0,05-0,10 m, que obteve valor de 57,69 m, sendo superior à área sob pastagem para a mesma profundidade). Isso mostra alta variabilidade dos atributos do solo para pequenas distâncias de coleta, fortalecendo a justificativa de maior heterogeneidade dos atributos do solo em relação às demais áreas.

Em área sob pastagem, os alcances foram de 14,02 m, 21,25 e 28,13 m, em suas respectivas camadas, sendo uma malha com distância de coleta mínima de oito (8) metros. Para a área sob floresta, por outro lado, evidenciou um comportamento mais homogêneo para todas as camadas, em comparação as outras áreas, com dependência de correlação espacial chegando a alcance de 34,75 m, 92,71 m e 77,44 m, respectivamente.

## 4 I CONCLUSÕES

Houve mudança significativa dos atributos físicos Ds, VTP, MaP e MiP em relação ao tipo de cobertura para camadas até 20 cm de profundidade. A RP apresentou seu menor valor sob floresta, que corrobora com baixos valores de Ug e Ds. Os respectivos usos do solo também promoveram alterações aos valores de CO e EC, com melhores resultados em áreas sob o uso de feijão guandu e floresta.

Na análise multivariada, as áreas de feijão guandu e pastagem apresentaram comportamentos semelhantes, com estabilidades dos agregados acima da média, assim como características estruturais, textura e do carbono orgânico abaixo da média.

No semivariograma escalonado teve predominância o modelo exponencial, com grau de dependência espacial forte para os usos do solo sob feijão guandu e pastagem e moderara para a área sob floresta. A área sob feijão guandu apresentou maior heterogeneidade, com menor alcance de independência espacial da variância entre os pares.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, R.S., STONE, L.F., SILVEIRA, P.M. Culturas de cobertura e qualidade física de um Latossolo em plantio direto. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 411-8, 2009.

AQUINO, R.E., CAMPOS, M.C.C., JUNIOR, J.M., OLIVEIRA, I.A., TEIXEIRA D.D.B., CUNHA, J.M. Use of scaled semivariograms in the planning sample of soil physical properties in southern Amazonas, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 21-30, 2015.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Projeto Radam brasil - Folha SB. 20, Purus. Rio de Janeiro, 1978. 561p.

CALONEGO, J.C., SANTOS, C.H., TIRITAN, C.S., CUNHA JÚNIOR, J.R. Estoque de carbono e propriedades físicas de solos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Caatinga**, v. 24, p. 128-35, 2012.

CAMBARDELLA, C.A., MOORMAN, T.B., NOVAK, J.M., PARKIN, T.B., KARLEN, D.L., TURCO, R.F., KONOPKA, A.E.. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa. ***Soil Science Society of America*** *Journal*, v. 58, p. 1501-11, 1994.

CAMPOS, M.C.C., SANTOS, L.A.C., SILVA, D.M.P., MANTOVANELLI, B.C., SOARES, M.D.R. Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, AM. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 6, p. 102-9, 2012.

CEDDIA, M.B., VIEIRA, S.R., VILLELA, A.L.O., MOTA, L.S., ANJOS, L.H.C., CARVALHO, D.F.Topography and spatial variability of soil physical properties. **Scientia Agrícola**, v. 66, p. 338-52, 2009.

CRESSIE, N. Statistics for spatial data. New York: John Wiley, 1991.

CUNHA, E.Q., STONE L.F., MOREIRA, J.A.A., FERREIRA, E.P.B., DIDONET, A.D., LEANDRO, W.M. Sistemas de preparo do solo e cultura de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 589-602, 2011.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. Manual de métodos de análise de solo. 2ª.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solo, 2011.

IORI, P., DIAS JÚNIOR, M.S., SILVA, R.B. Resistência do solo à penetração e ao cisalhamento em diversos usos do solo em áreas de preservação permanente. **Bioscience Journal**, v. 28, p. 185-95, 2012.

ISAAKS, E.H., SRIVASTAVA, R.M. An introduction to applied geoestatistics. New York: Oxford University Press, 1989.

KÄMPF, N., KERN, D.C. O solo como registro da ocupação humana pré-histórica na Amazônia. In: Vidal-Torrado P, Alleoni LRF, Cooper M, Silva AP, Cardoso EJ, organizadores. Tópicos em Ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. v. 5, p.277-320.

KEMPER, W.D., CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: Black CA, Evans DD, White JL, Ensminger LE, Clark FE, editors. Methods of soil analysis – Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Madison: American Society of Agronomy,1965. p.499-510.

MATOS, E.S., MENDONÇA, E.S., LEITE, L.F.C., GALVÃO, J.C.C. Estabilidade de agregados e distribuição de carbono e nutrientes em Argissolo sob adubação orgânica e mineral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 1221-30, 2008.

MANLY, B.J.F. Métodos estatísticos multivariados: uma introdução. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

MELO, V.F., SCHAEFER, C.E.G.R. Matéria orgânica em solos desenvolvidos de rochas máficas no nordeste de Roraima. **Acta Amazonica**, v. 39, p. 53-60, 2009.

OLIVEIRA, I.A., CAMPOS, M.C.C., SOARES, M.D.R., AQUINO, R.E., JUNIOR, J.M., NASCIMENTO, E.P. Variabilidade espacial de atributos físicos em um CambissoloHáplico, sob diferentes usos na região do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1103-12, 2013.

OLIVEIRA IA, JUNIOR JM, CAMPOS MCC, AQUINO RE, FREITAS L, SIQUEIRA DS, CUNHA JM.Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de Argissolos da região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 668-81, 2015a.

OLIVEIRA, I.A., CAMPOS, M.C.C., FREITAS, L., SOARES, M.D.R. Caracterização de solos sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Acta Amazonica**, v. 45, n. 1, p. 1-12, . 2015b. dx.doi. org/10.1590/1809-4392201400555

ROBERTSON, G.P. GS+: Geostatistics for the environmental sciences. Gamma design software, Plainwell: MI, 1998.

ROSSETTI, K.V., CENTURION, J.F. Estoque de carbono e atributos físicos de um Latossolo em cronossequência sob diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 252-8, 2015.

ROZANE, D.E., CENTURION, J.F., ROMUALDO, L.M., TANIGUCHI, C.A.K., TRABUCO, M., ALVES, A.U. Estoque de carbono e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho Distrófico, sob diferentes manejos. **Bioscience Journal**, v. 26, p. 24-32, 2010.

SANTOS, L.A.C., CAMPOS, M.C.C., BERGAMIN, A.C., SILVA, D.M.P., MENDONÇA JÚNIOR, A.F. Característica física de seis sitos de terras pretas arqueológicas na região de Apuí-AM. **Revista Verde**, v. 6, p. 167-74, 2011.

SANTOS, K.S., MONTENEGRO, A.A.A., ALMEIDA, B.G., MONTENEGRO, S.M.G.L., ANDRADE, T.S., FONTES JÚNIOR, R.V.P. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos do vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 828-35, 2012.

SANTOS, L.A.C., CAMPOS, M.C.C., AQUINO, R.E., BERGAMIN, A.C., SILVA, D.M.P., JUNIOR, J.M., FRANÇA, A.B. Caracterização de Terras Pretas Arqueológicas no Sul do Estado do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 825-36, 2013.

SILVA, A.R., SILVA, L.L., FRAZÃO, J.J., SALGADO, F.H.M., SILVA, M.C., CORRECHEL, V. Resistência mecânica à penetração do solo com diferentes coberturas vegetais sob sistema. **Revista Cientifica Eletrônica da Agronomia**, v. 22, p. x-x, 2012.

SILVA, F.F., FREDDI, O.S., CENTURION, J.F., ARATANI, R.G., ANDRIOLI, F.F., ANDRIOLI, I. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho cultivado no sistema plantio direto. **Revista Irriga**, v. 13, p. 191-204, 2008.

SILVEIRA, D.C., FILHO, J.F.M, SACRAMENTO, J.A.S., SILVEIRA, E.C.P. Relação umidade *versus* resistência à penetração para um Argissolo Amarelo Distrocoeso no Recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 659-67, 2010.

SOARES, D. R., CAMPOS, M. C. C., SOUZA, Z. M., BRITO, W. B. M., FRANCISCON, U., CASTIONI, G. A. F. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob pastagem em Manicoré, AM. **Revista Ciencêncis Agrartias**, v. 58, n. 4, p. 434-441, 2015.

STATSOFT Inc 7.0. Statistica (data analysis software system). USA: 2004.

TAVARES FILHO, J., TESSIER, D. Compressibility of oxisol aggregates under no-till in response to soil water potential. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1525-1533, 2009.

VIANA, E.T., BATISTA, M.A., TORMENA, C.A., COSTA, A.C.S., INOUE, T.T. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 2105-14, 2011.

VOLK, L.B.S., COGO, N.P. Relações entre tamanho de sedimentos erodidos, velocidade da enxurrada, rugosidade superficial criada pelo preparo e tamanho de agregados em solo submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1459-71, 2009.

WARRICK, A.W., NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel D, editor. Applications of soil physics. New York: Academic Press, 1980, p.319-44.

WHITE, P.J., CRAWFORD, J.W., ÁLVAREZ, M.C.D., MORENO, R.G. Soil Management for Sustainable Agriculture. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2012, p. 1-3, 2012.

YEOMANS, J.C., BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, p. 1467-76, 1988.

# CAPÍTULO 10

# VARIABILIDADE ESPACIAL DA TEXTURA DO SOLO EM ÁREA DE TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA SOB DIFERENTES USOS NA REGIÃO SUL DO AMAZONAS

*Data de aceite: 18/05/2021*

**Elilson Gomes de Brito Filho**
Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal da Paraíba
Areia - Paraíba
https://orcid.org/0000-0001-6718-2126

**Bruno Campos Mantovanelli**
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria – Rio Grande do Sul
https://orcid.org/0000-0003-4291-1729

**Wildson Benedito Mendes Brito**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
https://orcid.org/0000-0002-4267-5992

**Julimar Fonseca da Silva**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://lattes.cnpq.br/0057423446433221

**Milton César Costa Campos**
Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal da Paraíba
Areia - Paraíba
https://orcid.org/0000-0002-8183-7069

**José Maurício da Cunha**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
https://orcid.org/0000-0003-4057-1708

**RESUMO:** O bioma amazônico possui uma vasta biodiversidade, com solos em sua maioria de baixa fertilidade, porém com algumas manchas denominadas de terras pretas arqueológicas (TPA), onde esses solos apresentam, alta fertilidade natural e potencial físico em relação aos solos adjacentes. O objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade espacial da textura em áreas de terras pretas arqueológica sob diferentes usos na região sul do Amazonas. O estudo foi realizado no município de Apuí, sendo que na área de estudo, foi estabelecido um grid amostral de 88 por 64 m, e os solos foram amostrados nos pontos de cruzamento da malha, com intervalos regulares de 8 m, totalizando 88 pontos amostrais. Foram coletadas amostras de solos na profundidade de 0,0-0,5 m. A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta. Os dados foram submetidos à estatística descritiva e geoestatística. A área sob manejo de pastagem apresentou maior variabilidade espacial se tratando de atributos granulométricos.
**PALAVRAS-CHAVE:** Geoestatística, TPA, Granulometria.

## SPACE VARIABILITY OF SOIL TEXTURE IN ARCHAEOLOGICAL BLACK LAND AREA UNDER DIFFERENT USES IN THE SOUTH REGION OF AMAZONAS

**ABSTRACT**: The Amazonian biome has a vast biodiversity, with mostly low fertility soils, but with some clack soils called Archeological Dark Earth, where these soils present high natural fertility and physical potential in relation to the adjacent soils. The objective of this work was to evaluate the spatial variability of texture in areas of Archeological Dark Earth under different uses

in the southern region of Amazonas. In the study area, a mesh measuring 88 x 64 m was established, so that the soils were sampled at the crossing points of the mesh, with regular intervals of 8 m, totaling a total of 88 sample points. Soil samples were collected at depth 0.0-0.5 m to the south of the state of Amazonas, respectively, in the city of Apuí to perform the physical analysis of texture by the pipette method, and then the data were submitted to descriptive statistics and geostatistics. Area under pasture management showed greater spatial variability when it comes to texture attributes granulometric.
**KEYWORDS**: Geostatistics, ABE, granulometry.

## 1 I INTRODUÇÃO

As Terras Pretas Arqueológicas (TPA's) geralmente apresentam a fração areia como dominante em grande parte dos sítios localizados ao Sul do Amazonas, mas são observadas grande variação entre os sítios com textura que podem variar entre arenosa e muito argilosa (LIMA et al., 2002, TEIXEIRA & MARTINS, 2003). Além das características físicas das TPA's serem notoriamente conhecidas, as propriedades físicas apresentam enorme potencial, se destacando a condutividade hidráulica, porosidade, resistência do solo a penetração. O que vai influenciar na aeração que por fim contribuir para as trocas gasosas no solo, acelerando o processo da decomposição da matéria orgânica. (NEVES JÚNIOR, 2008).

De acordo com Daniels & Nelson (1987) as variações granulométricas do solo estão relacionadas ao material de origem, e este pode depender do ambiente deposicional dos sedimentos, do tipo de rocha que originou o solo e de processos pedogenéticos. Leão (2010) destaca que além do material de origem, o relevo influencia a variabilidade da textura, uma vez que condiciona o tempo de exposição dos materiais à ação do intemperismo, e podendo variar entre pontos relativamente próximos em área de mesma unidade taxonômica.

Caracterizando solos antropogênicos e não antropogênicos Campos et al. (2012) encontraram em área sob cultivo de milho textura variando entre arenosa e argilosa, enquanto Soares et al. (2015) estudando atributos físicos do solo nessas áreas sob manejo de pastagem constataram textura arenosa. Sendo que nas áreas de TPA temos como principal matéria de origem da alteração dos granitos rondonianos (CPRM, 2001). Porém, o relevo dessas áreas é bastante distinto Reis & Ferreira (2006). O que ocasiona diferentes textura em no mesmo tipo de solos nessa região.

A variabilidade espacial dos atributos do solo estudados pela análise geoestatística, esta funciona como um conjunto de técnicas aplicadas a variáveis regionalizadas, por ela se definem a estrutura de dependência espacial e grau de correlação de cada variável em determinado local com o uso da estatística georreferênciada, além de proporciona meios para que sejam efetuados os respectivos mapeamentos da área estudada através da krigagem podendo então caracterizar o comportamento dos atributos no solo de acordo com relevo, material de origem, tempo, clima, organismos (MARINS et al., 2008, SILVA et

al., 2010, AQUINO et al., 2014).

Partindo da necessidade de se ter conhecimento do comportamento de dependência dos atributos no solo, logo este trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade espacial da textura em áreas de TPA's sob diferentes usos no sul do Amazonas.

## 2 I MATERIAIS E MÉTODOS

As áreas de estudo localizam-se ao Sul do Estado do Amazonas, onde o material de origem é proveniente da alteração de granitos Rondonianos, do Pré-Cambriano Superior, sedimentos coluviais, depositados nas partes mais baixas da paisagem, e coberturas terciárias (BRASIL, 1978). A área de TPA sob pastagem está localizada no município de Manicoré, sob as coordenadas geográficas de 7° 59' 22" de latitude sul e 61° 39' 51,2" de longitude oeste com altitude média de 83 m (Figura 1). O solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico (Campos, 2009) ou um Paleudalf (Soil Survey Staff, 2014). As áreas de TPAs sob cacau e café, estão localizadas no município de Apuí, sob as coordenadas geográficas 7° 12' 05" de latitude sul e 59° 39' 35" e longitude oeste. A TPA sob cacau vem sendo cultivado há 14 anos. O solo nas duas áreas de TPA no município de Apuí foi classificado como Argissolo Amarelo eutrófico, segundo Embrapa (2013) ou um Paleudalf (Soil Survey Staff, 2014).

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Am, tropical chuvoso, com um período seco de pequena duração, e temperaturas variando entre 25°C e 27°C, e com precipitações pluviais entre 2.250 e 2.750 mm, com chuvas concentradas no período de outubro a junho (Brasil, 1978). O relevo é constituído por platôs com superfícies planas, sendo a zona de borda marcada por colinas e cristas alinhadas e localmente escarpadas, enquanto as áreas planas têm como principal característica a presença de uma superfície pediplanada (CPRM, 2001).

Foi realizado o mapeamento de três áreas de TPA sob diferentes usos. Nestas foram estabelecidos grids com dimensões de 88 x 64 m, espaçamento regular de 8 m entre os pontos amostrais. Os solos foram amostrados nos pontos de cruzamento da malha nas profundidades 0,0-0,05 m totalizando 88 pontos amostrais por sistema de uso. Esses pontos foram georreferenciados com um equipamento de GPS para construção do Modelo Digital de Elevação (MDE).

A composição granulométrica foi determinada pelo método da pipeta, utilizando solução de NaOH 0,1N como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de baixa rotação por 16 h, seguindo método proposto pela EMBRAPA (2011). A fração argila foi separada por sedimentação, de acordo com a lei de Stokes, sendo a fração silte determinada por diferença. Os atributos granulométricos foram avaliados por meio de estatística descritiva calculando-se a média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria e coeficiente de curtose. A hipótese de normalidade

dos dados foi testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, no software estatístico Minitab Release 14 (MINITAB, 2000).

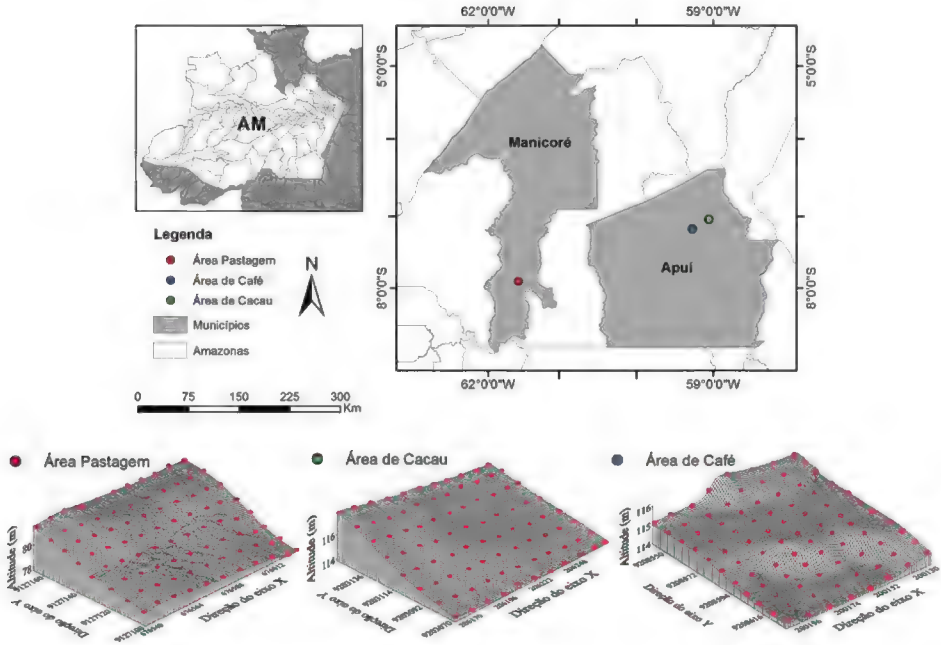



Figura 1. Mapa de localização e modelo digital de elevação das áreas de estudo na região sul do Amazonas.

Para a caracterização da variabilidade espacial, foi utilizada a análise geoestatística. Sob teoria da hipótese intrínseca o semivariograma experimental foi estimado pela Equação (1) (Vieira et al., 1983).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \qquad (1)$$

onde: γ (h) - valor da semivariância para uma distância h, N (h) - número de pares envolvidos no cálculo da semivariância, Z (xi) - valor do atributo Z na posição xi, Z (xi+h) - valor do atributo Z separado por uma distância h da posição xi.

Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de γˆ (h) são definidos os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma: o efeito pepita (Co), o patamar (C1), a variância estrutural (Co + C1), e o alcance (a). O efeito pepita é o valor da semivariância para distância h=0 e representa o componente da variação ao acaso. O patamar é o valor da semivariância e o alcance é à distância da origem até onde o patamar atinge valores estáveis e indica a distância em que os atributos estão correlacionados.

A determinação da dependência espacial, foi classificada em fraca, média e moderada de acordo com a proposta de Cambardella et al. (1994) onde: GDE% = (Co/Co+C1)100, se GDE ≤ 25 % é considerado forte, entre 25 e 75 % moderado, e acima de 75% fraco grau de dependência. Para escolha do melhor modelo a ser utilizado se considerou o $R^2$ (coeficiente de determinação).

## 3 I RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de média e mediana dos atributos texturais, foram semelhantes, tendendo a uma distribuição simétrica (Tabela 1). Quando avaliada a média dos atributos texturais foi possível observar domínio da fração silte, nas áreas de cacau e café a qual corresponde a mais da metade da composição granulométrica. Neste sentido, Santos et al. (2013), Aquino et al (2014) trabalhando com áreas de TPAs no sul do Amazonas obtiveram resultados semelhantes, justificando essa grande dominância de silte em decorrência do alto grau de intemperização.

Na área de pastagem observou-se dominância da fração areia, tendendo este solo a textura arenosa (Tabela 1), segundo Smith (1980), a maior concentração de areia entre as frações granulométricas é uma característica comum das TPA's, que pode ser atribuída à formação de material organomineral estável de tamanho equivalente à areia, o qual resulta da combinação da prática do uso do fogo e do depósito de material orgânico pelos ameríndios que ocupavam essas localidades (Teixeira et al., 2010). No mesmo sentido, Campos et al. (2011) destacam que a textura mais arenosa é decorrente da possível influência de materiais coluviais, provenientes das partes mais altas do terreno.

| Estatística Descritiva | Cacau | | | Café | | | Pastagem | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Areia | Silte | Argila | Areia | Silte | Argila | Areia | Silte | Argila |
| | ----------g.kg$^{-1}$---------- | | | | | | | | |
| Média | 221,10 | 572,83 | 204,52 | 364,65 | 617,37 | 17,98 | 712,30 | 237.67 | 50.03 |
| Mediana | 217,50 | 577,00 | 205,50 | 367,44 | 614,87 | 17,13 | 711,87 | 237.94 | 49,12 |
| [1]DP | 49,59 | 32,01 | 44,06 | 34,70 | 35,03 | 6,99 | 42,36 | 42,07 | 20,38 |
| [2]CV% | 22,43 | 5,59 | 21,54 | 9,52 | 5,67 | 38,86 | 5,95 | 17,70 | 40,73 |
| Assimetria | 0,37 | -0,54 | -0.03 | -0,13 | -0,09 | 7,67 | 1,17 | -0,66 | 0,43 |
| Curtose | -0,30 | 1,18 | 0,10 | -0,08 | 0,29 | 66,72 | 6,93 | 4,95 | 0,68 |
| [3]d | 0,10* | 0,09* | 0,08* | 0,05* | 0,05* | 0,26* | 0,08* | 0,07* | 0,06* |

[1]DP: desvio padrão, [2]CV: coeficiente de variação, [3]d: teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov, *significativo a 5 % de probabilidade.

Tabela 1: Estatística descritiva da textura do solo na profundidade de 0,0-0,05 em área de TPA sob o uso de cacau, café e pastagem, no município de Manicoré, AM.

Os valores do coeficiente de variação (CV%) de acordo com Warrick e Nielsen (1980), foi possível verificar que somente a variável silte apresentou baixa variabilidade nas áreas de cacau e café, já as frações areia e argila em todas ás áreas, juntamente com o silte na área de pastagem apresentaram moderada variabilidade. Vale ressaltar que as frações texturais são estáveis, ou seja, se modificam pouco ao longo do tempo, apresentando baixo coeficiente de variação (SOARES et al., 2015). Com base nos coeficientes de assimetria e curtose com exceção da argila na área de café, todos os demais apresentaram distribuição normal dos dados o que pode ser evidenciado pela proximidade média e mediana. Com relação ao teste de normalidade, todas as variáveis de todas as áreas foram significativas a 5% de probabilidade.

Com base na classificação de Cambardella et al. (1994), de acordo com os valores obtidos, observou-se que nas áreas de cacau e café todas as variáveis apresentaram forte grau de dependência espacial para areia, silte e argila, com valores próximos de zero. Ainda para Cambardella et al.(1994) as variáveis que apresentam grau de dependência forte são mais influenciadas pelos fatores intrínsecos como os fatores formação do solo e as fracas por fatores extrínsecos como o manejo do solo. a área de pastagem verificou-se para silte e areia um grau de dependência moderado. Resultados semelhantes foram encontrados por Soares et al. (2015), em estudo de atributos físicos do solo em área de Terra Preta Arqueológica. Observa-se que a variável argila na área de pastagem não apresentou estrutura de dependência espacial conferindo a esse atributo efeito pepita puro (EPP), sendo o EPP a variabilidade não detectada pela amostragem (CAMBARDELLA et al., 1994).

| Parâmetros | Cacau | | | Café | | | Pastagem | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Areia | Silte | Argila | Areia | Silte | Argila | Areia | Silte | Argila |
| Modelo | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. | Exp. | Esf. | Esf. | Lin. |
| Efeito Pepita ($C^0$) | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,05 | 0,05 | 0,01 | 991 | 727 | - |
| Patamar ($C^0 + C^1$) | 2515,00 | 887,90 | 1893,00 | 1163 | 1314 | 6,46 | 1920,3 | 1843 | - |
| Alcance (a) | 42,00 | 23,48 | 28,50 | 26,25 | 18,75 | 17,2 | 47,2 | 34,6 | - |
| [1]GDE % | 0,04 | 0,11 | 0,05 | 0,004 | 0,003 | 0,15 | 48 | 60 | EPP |
| [2]$R^2$ | 0,895 | 0,893 | 0,906 | 0,89 | 0,98 | 0,418 | 0,77 | 0,65 | - |
| [3]VC | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,89 | 0,91 | - |

Exp.: Exponencial, Esf.: Esférico, [1]GDE%: grau de dependência espacial, [2]$R^2$: coeficiente de determinação, [3]VC: validação cruzada.

Tabela 2: Modelos e parâmetros estimados aos semivariogramas experimentais dos atributos granulométricos do solo em área de TPA sob uso de cacau, café e pastagem, na região de Manicoré, AM.

Os modelos que mais se ajustarão aos parâmetros do semivariograma foi o exponencial e o esférico. De acordo os dados apresentados nos parâmetros dos semivariogramas os valores de Validação Cruzada (VC) e $R^2$ se apresentaram acima de 0,65 em quase todas as variáveis granulométricas, com exceção da argila sob manejo de café que apresentou $R^2$ inferior a 0,65 (Tabela 2). Neste contexto, valores acima de 0,6 além de assegurar um bom desempenho da interpolação pela krigagem ordinária, indicam afirmar que os semivariogramas apresentam ajustes que captam as estruturas de variação espacial do meio amostral (AZEVEDO, 2004).

O alcance estabelece o limite de dependência espacial entre as amostras, (Reichardt 1985, Trangmar et al. 1985). Quanto maior o alcance, maior a variabilidade (Oliveira et al, 2013). Sendo assim considerando o pressuposto, observa-se os maiores valores de alcance na área de pastagem significando uma dependência menor, ou seja, uma variabilidade maior. Assim, este valor será utilizado como intervalo entre as distâncias unidades de solos a serem mapeadas (WEBSTER, 2000).

## 4 I CONCLUSÃO

Através do estudo dos atributos texturais do solo observa-se que ás áreas de cacau, café e pastagem apresentaram respectivamente as texturas média, arenosa e argilosa.

A área sob manejo de pastagem, foi a que mais se diferenciou em relação às áreas de cacau e café, apresentando maiores alcance (a) e menor grau de dependência espacial (GDE), também apresentando EPP no atributo argila na mesma.

## REFERÊNCIAS

AQUINO, R. E., CAMPOS, M. C. C., DE OLIVEIRA, I. A., JUNIOR, J. M., SILVA, D. M. P., SILVA, D. A. P. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos antropogênico e não antropogênico na região de Manicoré, AM= Spatial variability of soil physical anthropogenic and non anthropogenic in the region of Manicoré, AM. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 4, 2014.

AZEVEDO, E. D. (2004). Uso da geoestatística e de recursos de geoprocessamento no diagnóstico da degradação de um solo argiloso sob pastagem no estado de Mato Grosso. 2004. 141 f (Doctoral dissertation, Tese (Doutorado) -Faculdade de Engenharia Agrícola, **Universidade Estadual de Campinas**, Campinas).

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Projeto Radam Brasil,** folha SB. 20, Purus. Rio de Janeiro. 561 p. 1978.

CAMBARDELLA, C. A., MOORMAN, T. B., NOVAK, J. M., PARKIN, T. B., KARLEN, D. L., TURCO, R. F., KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil science society of America journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CAMPOS, M. C. C., DOS SANTOS, L. A. C., DA SILVA, D. M. P., MANTOVANELLI, B. C., SOARES, M. D. R. Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 6, n. 2, 102-109, 2012.

CAMPOS, M. C. C., RIBEIRO, M. R., SOUZA JÚNIOR, V. S., RIBEIRO FILHO, M. R., SOUZA, R. V. C. C., ALMEIDA, M. C. Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, v. 70, n. 03, p. 598-609, 2011.

CAMPOS, M.C.C. Pedogeomorfologia aplicada a ambientes Amazônicos do Médio Rio Madeira [tese]. Recife: **Universidade Federal Rural de Pernambuco**. 2009.

CPRM. Centro de Pesquisa de Recursos Minerais. **Hidroclimatologia, geologia, recursos minerais, geomorfologia e unidades de paisagens**. Manaus. 93p. 2001.

CUNHA, T. J. F., MADARI, B. E., CANELLAS, L. P., RIBEIRO, L. P., BENITES, V. D. M., SANTOS, G. D. A. Soil organic matter and fertility of anthropogenic dark earths (Terra Preta de Indio) in the Brazilian Amazon basin. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 85-93, 2009.

DANIELS, R. B., NELSON, L. A. Soil variability and productivity: future developments. **Future Developments in Soil Science Research**, n. futuredevelopme, p. 279-291, 1987.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solo**. 3ª ed. Brasília: DC. 2013.

Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro. 212p. 2011.

GLASER, B. Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 362, n. 1478, p. 187-196, 2007.

KÄMPF, N., KERN, D. C. O solo como registro da ocupação humana pré-histórica na Amazônia. **Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 4, p. 277-320, 2005.

LEÃO, M. G., MARQUES JÚNIOR, J., SOUZA, Z. M. D., PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial da textura de um latossolo sob cultivo de citros. **Ciência e Agrotecnologia**, p. 121-131, 2010.

LIMA, Hedinaldo N. et al. Pedogenesis and pre-Colombian land use of "Terra Preta Anthrosols"("Indian black earth") of Western Amazonia. **Geoderma**, v. 110, n. 1, p. 1-17, 2002.

MESQUITA, M. L., BRANCO, VERÔNICA, T. F. C., SOARES, J. B. Utilização dos testes estatísticos de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para verificação da normalidade para materiais de pavimentação. **Transportes**, v. 21, n. 1, p. 59-66, 2013.

MARINS, A. C., URIBE-OPAZO, M. A., JOHANN, J. A. Estimadores new1 e new2 no estudo da dependência espacial da produtividade da soja e atributos físicos do solo em uma área comercial. **Engenharia na Agricultura**, p. 133-143, 2008.

Minitab Release 14.1(2000) **Statistical Software**. US/Canada.

OLIVEIRA, I. A. D., CAMPOS, M. C. C., SOARES, M. D. R., AQUINO, R. E. D., MARQUES JÚNIOR, J., NASCIMENTO, E. P. D. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 1103-1112, 2013.

NOGUEIRA, M. C. S. Experimentação agronômica I. Piracicaba: **Universidade de São Paulo**. 463p. 2007.

REIS, N. J., FERREIRA, A. L. **Geologia e recursos minerais do estado do Amazonas**. Ministério de Minas e energia. Manaus, 153p, 2006.

REICHARDT, K. Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. **Campinas: Fundação Cargill**. 486p. 1985.

SANTOS, L. A. C. D., CAMPOS, M. C. C., AQUINO, R. E. D., BERGAMIN, A. C., SILVA, D. M. P. D., MARQUES JUNIOR, J., FRANÇA, A. B. C. Caracterização de terras pretas arqueológicas no sul do estado do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 825-836, 2013.

SILVA, F. W. R., LIMA, H. N., TEIXEIRA, W. G., MOTTA, M. B., SANTANA, R. M. Caracterização química e mineralogia de solos antrópicos (Terra Pretas de Índio) na Amazônia Central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 673-681. 2008.

SMITH, N. J. H. ANTHROSOLS AND HUMAN CARRYING CAPACITY IN AMAZONIA*. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 70, n. 4, p. 553-566, 1980.

SOARES, M. D. R., CAMPOS, M. C. C., SOUZA, Z. M. D., BRITO, W. B. M., FRANCISCON, U., CASTIONI, G. A. F. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob pastagem em Manicoré, AM. **Revista de Ciências Agrárias/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 58, n. 4, p. 434-441, 2016.

Soil Survey Staff. Keys to soil taxonomy. 12th ed. Washington, **DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service**, 2014

TEIXEIRA, W. G., MARTINS, G. C. Soil physical characterization. In: **Amazonian dark earths**. Springer Netherlands, 2003. p. 271-286.

TEIXEIRA, W. G. T. **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Embrapa Amazônia Ocidental, 2010.

TRANGMAR, B. B., YOST, R. S., UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in agronomy**, v. 38, p. 45-94, 1986.

VIEIRA, S. R. J. L., HATFIELD, J., NIELSEN, D., BIGGAR, J. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **California Agriculture**, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.

WARRICK, A. W. Spatial variability of soil physical properties in the field. **Applications of soil physics**, p. 319-344, 1980.

WEBSTER, R. Is soil variation random?. **Geoderma**, *97*(3), 149-163. 2000.

WEBSTER, R., BUTLER, B. E. Soil classification and survey studies at Ginninderra. **Soil Research**, v. 14, n. 1, p. 1-24, 1976.

# CAPÍTULO 11

# VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO EM ÁREA DE TERRA PRETA ARQUEOLOGICA SOB CULTIVO DE CACAU EM APUÍ, AM

*Data de aceite: 18/05/2021*
*Data de submissão: 11/05/2021*

**Anderson Cristian Bergamin**
Universidade Federal de Rondônia
Rolim de Moura – Rondônia
http://orcid.org/0000-0002-3159-2219

**Douglas Marcelo Pinheiro da Silva**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://orcid.org/0000-0001-8147-5726

**Milton César Costa Campos**
Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal da Paraíba
Areia - Paraíba
https://orcid.org/0000-0002-8183-7069

**Uilson Franciscon**
Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://lattes.cnpq.br/1521927742256456

**Leandro Coutinho Alho**
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas
Lábrea – Amazonas
http://lattes.cnpq.br/4670525420962987

**Zigomar Menezes de Souza**
Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas
Campinas – São Paulo
https://orcid.org/0000-0001-9302-6725

**José Maurício da Cunha**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://lattes.cnpq.br/3425545536495518

**RESUMO**: Solos com horizonte A formado pela atividade humana, de caráter antropogênico A horizonte, são encontrados na Região Amazônica. Poucos estudos examinaram o espaço distribuição das propriedades desses solos. Mapeamos a variabilidade espacial das propriedades do solo em área de Terra Preta Arquelógico (TPA) na Amazônia Brasileira. Uma grade de amostragem foi definida em uma área de 42 × 88 m sob cultivo de cacau na qual os pontos de amostragem foram estabelecidos no espaçamento de 6 × 8 m, totalizando 88 pontos. Amostras foram coletados nas camadas de profundidade de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. As análises de textura do solo, estabilidade de agregados e carbono orgânico (CO) foram realizadas em amostras de solo deformadas. Amostras indeformadas foram utilizadas para determinar a macroporosidade do solo. (Macro), microporosidade (Micro), porosidade total (PT) e resistência do solo à penetração (RSP). Os resultados foram analisados por estatística descritiva, correlação de Pearson ($p < 0,01$), e geoestatística. Densidade aparente do solo, volume total de poros e diâmetro médio geométrico dependem da quantidade total de OC na área TPA. Aumento da densidade do solo e RP são proporcionais a uma diminuição no conteúdo de OC e menor Micro e TP. Além disso, a resistência do solo à

penetração é influenciada pela água do solo e pelo teor de argila com a profundidade.
**PALAVRAS-CHAVE**: Terra Preta de Índio, Sistemas de manejo, Solos amazônicos, Solos antropogênicos.

## SPATIAL VARIABILITY OF SOIL PROPERTIES IN ARCHEOLOGICAL DARK EARTH SITES UNDER CACAO CULTIVATION

**ABSTRACT**: Soils with an A horizon formed by human activity, an anthropogenic A horizon, are found in the Amazon Region. Few studies have examined the spatial distribution of the properties of these soils. We mapped the spatial variability of some soil properties in an area of Archaeological Dark Earth (ADE) in the Brazilian Amazon. A sampling grid was defined over an area of 42 × 88 m under cacao cultivation in which sampling points were established at a spacing of 6 × 8 m, for a total of 88 points. Samples were collected from the 0.00-0.05, 0.05-0.10, 0.10-0.20, and 0.20-0.30 m depth layers. Soil texture, aggregate stability, and organic carbon (OC) analyses were performed on disturbed soil samples. Undisturbed samples were used to determine soil microporosity (Macro), microporosity (Micro), total porosity (TP), and soil resistance to penetration (RP). The results were analyzed by descriptive statistic, Pearson correlation ($p<0.01$), and geostatistics. Soil bulk density, total pore volume, and geometric mean diameter are dependent on the total amount of OC in the ADE area. Increased soil bulk density and RP are proportional to a decrease in OC content and lower Micro and TP. Moreover, soil resistance to penetration is influenced by soil water and clay content with depth.
**KEYWORDS**: Indian Dark Earth, management systems, Amazon soils, anthropogenic soils.

## 1 I INTRODUÇÃO

Na região Amazônica ocorrem diversos tipos de solos, dentre estes aqueles com horizonte A antrópico, que possivelmente foram formados por meio de ações humanas promovidas no solo e em seus atributos morfológicos, físicos e químicos (SANTOS et al., 2013). As Terras Pretas Arqueológicas (TPAs) normalmente localizam-se em antigos assentamentos indígenas, e tem como características marcante presença de artefatos cerâmicos e culturais, coloração escura com grande depósito estável de matéria orgânica (CAMPOS et al., 2011).

A matéria orgânica do solo influência direta e indiretamente os atributos do solo (VIANA et al., 2011) e o seu estudo em agroecossistemas brasileiros é base para que se alcance a sustentabilidade agrícola (CUNHA et al., 2007). É sabido também que práticas de uso e manejo dos solos, e suas variações, interferem no equilíbrio natural dos ecossistemas alterando os componentes orgânicos tanto em quantidade como em qualidade (MELO & SCHAEFER, 2009).

Um dos atributos físicos do solo influenciado pela matéria orgânica é a agregação que está relacionada com a disponibilidade de água e ar para as raízes e microbiota, e com a resistência mecânica do solo à penetração (VIEIRA et al., 2010). Além da agregação do solo a matéria orgânica desempenha outras funções vitais ao ciclo da vida que vão

desde a atividade de microrganismos e da fauna do solo, até a ação positiva sobre a estabilidade dos agregados, porosidade e densidade do solo, contribuindo para diminuição da compactação do solo (SPERA et al., 2010).

Por outro lado, o manejo do solo e de plantas podem promover a degradação física, reduzindo a estabilidade de agregados, condutividade hidráulica e aumentando a densidade do solo, resistência do solo à penetração e a perda de carbono orgânico total (HICKMANN et al., 2012) e, consequentemente, alterando a evolução de gases para a atmosfera (CHAVES & FARIAS, 2008).

Considerando que a variabilidade espacial dos atributos do solo ocorre naturalmente devido a fatores pedogênicos diversos, somando-se ao manejo realizado pelo homem, acentuam a variação dos atributos do solo (OLIVEIRA et al. 2013), portanto, a manutenção e melhoria da qualidade do solo é um fator chave para a estabilidade, sustentabilidade e produtividade de ecossistemas naturais e de agroecossistemas. Desta forma, compreendendo e quantificando o impacto dos sistemas de manejo do solo na sua qualidade física torna-se possível o desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis (SILVA et al., 2008).

Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade espacial dos atributos do solo em área de Terra Preta Arqueológica no município de Apuí, AM.

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

O estudo localizou-se no município de Apuí, Amazonas, Brasil, situado ao longo da rodovia Transamazônica (BR-230), sob as coordenadas geográficas de 7°12'05" S e 59°39'37" W. Segundo a classificação de Köppen o clima da região pertence ao grupo A (Clima Tropical Chuvoso) e tipo climático Am (chuvas do tipo monção), apresentando um período seco de pequena duração. A pluviosidade está limitada pelas isoietas de 2.250 e 2.750 mm, com período chuvoso iniciando em Outubro e prolongando-se até Junho. As temperaturas médias anuais variam entre 25°C e 27°C e a umidade relativa fica entre 85 e 90%.

A geologia da região apresenta arenitos da formação Beneficiente, recoberto por pacote argiloso do terciário. Em relação aos solos presentes no município, ocorre predominância das classes: Argissolos e Latossolos, sendo que o solo da área de estudo foi classificado como Argissolo Amarelo Eutrofico segundo Embrapa, (2013), e predomina a vegetação primaria formada por Floresta Tropical Densa, constituída por árvores adensadas (SDS, 2004).

A área de TPA vem sendo cultivado à quatorze anos, nos primeiros seis anos abrigou o cultivos de arroz, milho, feijão e melancia, e posteriormente foi inserido a cultura do cacau que permanece até o presente estudo. Neste local foi delimitado uma malha de 42 x 88 m, com espaçamentos de 6 x 8 m, totalizando 88 pontos amostrais, nestes locais coletou-se

amostras nas profundidades 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

Nos pontos de cruzamento da malha foram coletados blocos de solo com estrutura preservada nas profundidades 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m para determinação da estabilidade dos agregados do solo. Inicialmente o solo foi seco ao ar e passado em peneira de 9,52 e 4,76 mm, em seguida a determinação da estabilidade de agregados foi realizada pelo método de peneiramento úmido. Os agregados retidos na peneira de 4,76 mm foram colocados sobre um jogo de peneiras com malhas de 2,0; 1,0; 0,5; 0,25; 0,105 e 0,063 mm. As amostras foram submetidas a oscilações verticais durante 15 minutos, numa frequência de 32 oscilações por minuto. Foi adotado como índice de estabilidade o diâmetro médio geométrico (DMG) e o diâmetro médio ponderado (DMP), cujo cálculo foi feito segundo Kemper & Rosenau (1986).

Para as determinações da macroporosidade, microporosidade, densidade do solo e volume total poros foram coletadas amostras com estrutura preservada nos pontos amostrais, utilizando-se anéis volumétricos, nas profundidades de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20 0 0,30 m. No laboratório, as amostras foram preparadas retirando-se das extremidades dos anéis o excesso de solo e, em seguida, foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja plástica, até atingir cerca de $^2/_3$ da altura das amostras. Após a saturação, as amostras foram pesadas e levadas à mesa de tensão para determinação da microporosidade do solo, sendo submetidas a uma tensão de 0,006 MPa (Embrapa, 1997).

Após atingirem o equilíbrio em um potencial matricial de -0,006 MPa, as amostras foram pesadas e, em seguida, foi medida a resistência do solo à penetração (RP), utilizando-se um penetrógrafo eletrônico modelo MA-933, marca Marconi, equipado com uma célula de carga de 200 N, haste com cone de 4 mm de diâmetro de base e semi-ângulo de 30°, com velocidade constante de penetração de 0,1667 mm $s^{-1}$, receptor e interface acoplado a um microcomputador, para registro das leituras por meio de um *software* próprio do equipamento. As amostras obtidas nos 5 mm superiores e inferiores das amostras foram descartadas, visando eliminar o efeito da periferia da amostra (Bradford, 1986).

A análise de textura foi realizada pelo método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH 0,1 mol $L^{-1}$ como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de alta rotação por 15 min. seguindo metodologia proposta pela Embrapa (1997). O carbono organico total foi determinado pelo método de Walkley-Black modificado por Yeomans & Bremner (1988).

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, sendo determinados a média, valores máximos e mínimos, coeficientes de assimetria e curtose, coeficiente de variação (CV) e distribuição de frequências dos dados. Esta análise foi realizada no software estatístico Minitab 14 (Minitab, 2000).

Para a caracterização da variabilidade espacial, foi utilizada a análise geoestatística. O semivariograma experimental foi estimado pela equação (1).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

sendo: γ(h) - valor da semivariância para uma distância h; N(h) - número de pares envolvidos no cálculo da semivariância; $Z(x_i)$ - valor do atributo Z na posição $x_i$; $Z(x_i+h)$ - valor do atributo Z separado por uma distância h da posição $x_i$.

Os semivariogramas experimentais foram escolhidos com base no número de pares envolvidos no cálculo da semivariância dos primeiros lags, presença de patamar claramente definido (Burrough & McDonnel, 2000) e o resultado da técnica de Jack Knifing (Vauclin et al., 1983).

Após o ajuste dos modelos matemáticos permissíveis foi feita à interpolação dos dados por meio da krigagem. A análise geoestatística foi realizada no *software* GS+ e os mapas de krigagem no *software* Surfer versão 8.00.

## 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise estatística descritiva dos atributos estudados são apresentadas nos Quadros 1 e 2. Observa-se que todos os atributos apresentaram valores de média e mediana próximos, e assimetria e curtose próximo de zero, com exceção do carbono orgânico total (COT) na profundidade de 0,05-0,10 e o silte nas profundidades 0,00-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m que apresentaram valores de curtose acima de 1, caracterizando assim uma distribuição simétrica dos dados. De acordo com Diggle & Ribeiro Júnior (2007) a proximidade dos valores média e mediana assegura uma distribuição simétrica dos dados, o que significa que a dispersão dos valores não apresenta caudas muito alongadas, o que poderia comprometer a análise geoestatística e ocorre somente quando os valores de assimetria e curtose são sensíveis a valores extremos de forma que um único valor pode exercer grande influência nos seus resultados.

| Estatística Descritiva | MaP | MiP | VTP | Ds | DMG | DMP | COT |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ----------%---------- | | | Mg $m^{-3}$ | ---------mm--------- | | g $kg^{-1}$ |
| | | | 0,00 - 0,05 m | | | | |
| Média | 19,96 | 49,05 | 69,00 | 0,90 | 2,67 | 3,13 | 114,52 |
| Mediana | 19,44 | 49,18 | 68,54 | 0,89 | 2,67 | 3,14 | 114,39 |
| [1]DP | 5,64 | 4,40 | 4,77 | 0,11 | 0,50 | 0,20 | 8,12 |
| Variância | 31,79 | 19,33 | 22,75 | 0,01 | 0,25 | 0,04 | 65,90 |
| [2]CV% | 28,24 | 8,96 | 6,91 | 11,76 | 18,87 | 6,30 | 7,09 |
| Assimetria | 0,38 | -0,74 | 0,16 | 0,45 | -0,34 | -0,64 | -0,08 |
| Curtose | -0,54 | 1,54 | 0,91 | 0,16 | 0,91 | 1,54 | -0,88 |
| [3]d | 0,07* | 0,07*s | 0,08* | 0,09*s | 0,09* | 0,01* | 0,07* |
| | | | 0,05 - 0,10 m | | | | |
| Média | 19,41 | 46,76 | 66,17 | 0,95 | 2,55 | 3,01 | 105,45 |
| Mediana | 18,78 | 47,01 | 65,48 | 0,95 | 2,54 | 3,05 | 104,66 |
| [1]DP | 5,30 | 4,82 | 4,36 | 0,09 | 0,45 | 0,21 | 4,69 |
| Variância | 28,10 | 23,28 | 19,00 | 0,01 | 0,20 | 0,04 | 21,97 |
| [2]CV% | 27,32 | 10,32 | 6,59 | 9,34 | 17,50 | 7,00 | 4,44 |
| Assimetria | 0,65 | -0,30 | -0,23 | 0,22 | 0,02 | -0,58 | 1.08 |
| Curtose | 0,18 | 1,36 | 4,18 | 0,44 | 0,61 | 0,27 | 1,85 |
| [3]d | 0,07* | 0,07* | 0,05* | 0,10*s | 0,05* | 0,08* | 0,04* |
| | | | 0,10 - 0,20 m | | | | |
| Média | 22,38 | 43,37 | 65,75 | 0,95 | 2,53 | 2,52 | 107,43 |
| Mediana | 22,41 | 42,72 | 66,42 | 0,94 | 2,63 | 2,61 | 101,41 |
| [1]DP | 5,25 | 3,83 | 4,31 | 0,10 | 0,43 | 0,50 | 6,44 |
| Variância | 27,54 | 14,71 | 18,59 | 0,01 | 0,19 | 0,25 | 41,42 |
| [2]CV% | 23,45 | 8,84 | 6,56 | 10,62 | 16,85 | 19,96 | 6,35 |
| Assimetria | -0,29 | -0,04 | -0,69 | 0,62 | -0,65 | -0,36 | 0,72 |
| Curtose | -0,33 | 1,18 | 0,70 | 0,32 | 0,06 | 0,34 | 0,43 |
| [3]d | 0,07* | 0,08* | 0,08* | 0,09*s | 0,02* | 0,05*s | 0,07* |
| | | | 0,20 – 0,30 m | | | | |
| Média | 21,65 | 41,98 | 63,63 | 0,98 | 2,50 | 2,51 | 101,01 |
| Mediana | 21,36 | 41,73 | 63,95 | 0,97 | 2,57 | 2,62 | 101,48 |
| [1]DP | 4,79 | 3,60 | 4,11 | 0,13 | 0,45 | 0,46 | 6,68 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Variância | 22,96 | 12,98 | 16,92 | 0,02 | 0,21 | 0,21 | 44,60 |
| [2]CV% | 22,13 | 8,58 | 6,46 | 13,46 | 18,15 | 18,22 | 6,24 |
| Assimetria | -0,03 | 0,37 | -0,21 | -1,48 | -0,25 | -0,20 | -0,36 |
| Curtose | -0,26 | 0,73 | -0,04 | 9,26 | 0,23 | -0,04 | 0,89 |
| [3]d | 0,05* | 0,05* | 0,07* | 0,09* | 0,09* | 0,08*ns | 0,10*s |

[1]DP: desvio padrão; [2]CV: coeficiente de variação;[3]d: teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov, *significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 1. Estatística descritiva da macroporosidade (MaP), microporosidade (MiP), volume total de poros (VTP), densidade do solo (Ds), diâmetro médio geométrico (DMG), diâmetro médio ponderado (DMP) e carbono orgânico total (COT) em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

Em relação ao teste de normalidade (Kolmogorov-Smirnov) (Quadros 1 e 2) todo os atributos em todas as profundidades estudadas apresentaram distribuição normal, assemelhando aos resultados encontrados por Aquino et al. (2014a) que estudou solos antropogênicos e não antropogênicos no sul do Amazonas. Para Isaaks & Srivastava (1989), a normalidade dos dados é importante, pois isso indica que a média e a variação dos dados são constantes na área de estudo, o que foi observado, ou seja, ocorrência de estacionaridade necessária ao uso da geoestatística.

De acordo com a classificação do coeficiente de variação (CV) proposta por Warrick & Nielsen (1980), que classificaram como baixa variabilidade CV < 12%, média variabilidade CV entre 12 e 60% e alta variabilidade CV > 60%, observa-se que parte dos atributos estudados apresentaram baixa variabilidade, com exceção do DMG, MaP, RSP, areia e argila em todas as profundidades estudadas e DMP nas pronfundidades 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, MiP na profundidade 0,00-0,05 m e Ds na profundidade de 0,20-0,30 m que apresentaram média variabilidade, estes resultados sao considerados promissores ja que estas variaveis normalmente tem alta variação no campo conforme afirma Aquino et al. (2014 b).

Os valores médios do DMP e DMG são maiores nas camadas superficiais e decrescem em profundidade coincidindo com o comportamento dos teores do COT (Quadro 1). Segundo Santos et al. (2013) em áreas de TPAs o carbono orgânico desempenha um papel determinante na formação e estabilização dos agregados, e a diminuição de seu conteúdo no solo alteram a estrutura do solo, já que a agregação, indiretamente, afeta outros atributos como porosidade, aeração, capacidade de retenção, infiltração de água.

| Estatística Descritiva | Areia | Silte | Argila | RSP | Us (vol) |
|---|---|---|---|---|---|
| | ----------g kg$^{-1}$---------- | | | Mpa | % |
| | | 0,00 - 0,05 m | | | |
| Média | 221,1 | 572,8 | 204,6 | 0,89 | 49,01 |
| Mediana | 217,5 | 577,0 | 205,5 | 0,84 | 48,89 |
| [1]DP | 49,6 | 32,0 | 44,1 | 0,37 | 4,39 |
| Variância | 2458,2 | 1024,5 | 1941,3 | 0,14 | 19,28 |
| [2]CV% | 22,4 | 5,6 | 21,4 | 32,63 | 8,96 |
| Assimetria | 0,37 | -0,54 | -0,03 | 0,34 | -0,72 |
| Curtose | -0,30 | 1,18 | 0,10 | -0,48 | 1,53 |
| [3]d | 0,06*s | 0,09* | 0,08* | 0,08* | 0,09* |
| | | 0,05 - 0,10 m | | | |
| Média | 195,2 | 534,0 | 265,4 | 0,91 | 46,76 |
| Mediana | 192,0 | 544,5 | 265,0 | 0,85 | 47,01 |
| [1]DP | 38,7 | 34,5 | 53,4 | 0,34 | 4,83 |
| Variância | 1499,6 | 1192,1 | 2850,0 | 0,11 | 23,40 |
| [2]CV% | 19,8 | 6,4 | 20,1 | 30,00 | 10,35 |
| Assimetria | 0,38 | -0,17 | 0,56 | -0,12 | -0,30 |
| Curtose | -0,05 | 0,82 | 0,40 | -0,54 | 1,32 |
| [3]d | 0,07* | 0,09*s | 0,07* | 0,07* | 0,06* |
| | | 0,10-0,20 m | | | |
| Média | 188,0 | 537,9 | 274,2 | 1,11 | 43,36 |
| Mediana | 181,0 | 536,5 | 275,5 | 1,10 | 42,72 |
| [1]DP | 36,10 | 37,6 | 47,97 | 0,34 | 3,83 |
| Variância | 1302,4 | 1413,8 | 2300,9 | 0,14 | 14,70 |
| [2]CV% | 19,2 | 7,0 | 17,5 | 41,62 | 8,84 |
| Assimetria | 0,57 | 0,46 | -0,05 | 0,52 | -0,04 |
| Curtose | 0,05 | 1,26 | -0,81 | -0,48 | 1,18 |
| [3]d | 0,09* | 0,07* | 0,06* | 0,07* | 0,09* |
| | | 0,20 – 0,30 m | | | |
| Média | 185,2 | 511,6 | 303,2 | 1,13 | 41,92 |
| Mediana | 182,5 | 516,5 | 301,0 | 1,12 | 41,73 |
| [1]DP | 32,0 | 48,6 | 65,3 | 0,36 | 3,63 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Variância | 1025,9 | 2359,3 | 4269,2 | 0,13 | 13,23 |
| [2]CV% | 17,3 | 9,5 | 21,5 | 38,96 | 8,68 |
| Assimetria | 0,56 | 0,17 | 0,09 | 0,42 | 0,39 |
| Curtose | 0,11 | 0,43 | -0,46 | -0,34 | 0,63 |
| [3]d | 0,06* | 0,08* | 0,05* | 0,08* | 0,05* |

RSP: resistência do solo à penetração; Us (vol.): umidade volumétrica do solo. [1]DP: desvio padrão; [2]CV: coeficiente de variação; [3]d: teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov; *significativo a 5 % de probabilidade.

Quadro 2. Estatística descritiva da areia, silte, argila, resistência do solo a penetração (RSP), umidade do solo (Us) em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

A densidade do solo apresenta-se valor abaixo de 1 Mg $m^{-3}$, indicando baixa densidade do solo (Quadro 1 e 2) verificou-se ainda aumento da Ds com o aumento de RSP e baixos teores de COT e diminuição da MiP e VTP, evidenciando assim o papel determinante do carbono orgânico no comportamento dessas variáveis conforme destacam Campos et al. (2011) que estudou perfis de TPA na região do médio Rio Madeira, embora tenha encontrado valores de COT nos horizontes antropogênicos, oscilando entre 43,7 e 80,3 g $kg^{-1}$ , valores estes abaixo dos encontrados neste trabalho. Santos et al. (2011) estudando atributos físicos em terras pretas arqueológicas na região sul do Amazonas encontraram valores de densidade do solo (Ds) com medias semelhantes a este trabalho na superfície e aumento em profundidade.

Os valores médios da RSP aumentaram com a profundidade coincidente com a diminuição da média da Us, evidenciando a influência da umidade na resistência do solo a penetração. Além disso, verificou-se o aumento dos teores de argila em profundidade, este fato e explicado que com o aumento da profundidade ultrapassa-se o horizonte antrópico e adentra os horizontes de natureza mais próxima ao material de origem, fato também observado por Santos et al. (2013) em estudo com TPAs na região de Apuí e Manicoré, AM.

Os resultados das análises geoestatísticas para o MaP, MiP, VTP, Ds, DMG, DMP, COT, RSP, Us, areia silte e argila são apresentados nos Quadros 3 e 4, verificou-se dependência espacial para todos os atributos estudados, com exceção para o COT na profundidade de 0,0-0,05 m, MiP e Us nas profundidades 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m os quais apresentaram efeito pepita puro, ou seja, variação aleatória na área de estudo. Os semivariogramas dos atributos do solo que apresentaram dependência espacial ajustaram-se predominantemente aos modelos exponencial e esférico (Quadros 3 e 4), corroborando com outros estudos que apontam serem os modelos que melhor se ajustam aos atributos do solo (SOUZA et al., 2009; CAJAZEIRA & ASSIS JUNIOR, 2011).

Os valores da validação cruzada (VC) foram a partir de 0,60, com exceção apenas do DMP na profundidade de 0,0-0,05 m que apresentou VC de 0,58 (Quadro 3), segundo

Wojciechowski et al., (2009) os valores da VC variam de 0 a 1, cuja os valores mais próximos de 1 apontam os mais eficiente modelos para representar o fenômeno estudado.

| Parâmetros | MaP | MiP | VTP | Ds | DMG | DMP | COT |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 0,00-0,05 m | | | | |
| Modelo | Exp | Lin | Exp | Exp | Exp | Esf | Lin |
| Efeito Pepita | 2,60 | - | 1,50 | 0,0009 | 0,041 | 0,013 | - |
| Patamar | 27,80 | - | 16,0 | 0,0089 | 0,221 | 0,027 | - |
| Alcance (m) | 24 | - | 21 | 22 | 35 | 37 | - |
| [1]$R^2$ | 0,94 | - | 0,80 | 0,83 | 0,94 | 0,99 | - |
| [2]GDE (%) | 9 | - | 9 | 10 | 19 | 48 | - |
| [3]VC% | 0,74 | - | 0,71 | 0,81 | 0,70 | 0,58 | - |
| | | | 0,05-0,10 m | | | | |
| Modelo | Exp | Lin | Esf | Exp | Exp | Exp | Exp |
| Efeito Pepita | 3,0 | - | 3,2 | 0,0008 | 0,018 | 0,007 | 2,70 |
| Patamar | 20,5 | - | 14,9 | 0,0006 | 0,135 | 0,039 | 22,67 |
| Alcance (m) | 24 | - | 20 | 30 | 26 | 31 | 26 |
| [1]$R^2$ | 0,84 | - | 0,96 | 0,89 | 0,94 | 0,98 | 0,85 |
| [2]GDE (%) | 15 | - | 22 | 13 | 13 | 18 | 12 |
| [3]VC% | 0,63 | - | 0,60 | 80 | 0,80 | 0,78 | 0,70 |
| | | | 0,10-0,20 m | | | | |
| Modelo | Exp | Lin | Esf | Exp | Esf | Esf | Exp |
| Efeito Pepita | 6,3 | - | 5,3 | 0,0008 | 0,009 | 0,047 | 4,90 |
| Patamar | 20,5 | - | 13,8 | 0,0008 | 0,194 | 0,196 | 42,85 |
| Alcance (m) | 30 | - | 27 | 28 | 43 | 39 | 25 |
| [1]$R^2$ | 0,86 | - | 0,95 | 0,97 | 0,97 | 0,98 | 0,90 |
| [2]GDE (%) | 31 | - | 38 | 10 | 5 | 24 | 11 |
| [3]VC% | 0,61 | - | 0,70 | 0,75 | 0,99 | 89 | 0,75 |
| | | | 0,20-0,30 m | | | | |
| Modelo | Exp | Exp | Esf | Exp | Esf | Exp | Exp |
| Efeito Pepita | 1,56 | 1,1 | 5,0 | 0,0015 | 0,017 | 0,021 | 4,20 |
| Patamar | 22,4 | 11,4 | 16,2 | 0,0096 | 0,162 | 0,204 | 45,63 |
| Alcance (m) | 22 | 20 | 21 | 20 | 11 | 34 | 24 |
| [1]$R^2$ | 0,62 | 0,93 | 0,92 | 0,95 | 0,94 | 0,99 | 0,91 |
| [2]GDE (%) | 7 | 10 | 31 | 16 | 11 | 10 | 9 |
| [3]VC% | 0,62 | 0,73 | 0,93 | 0,71 | 0,76 | 0,80 | 0,85 |

Est C: estoque de carbono do solo; COT: carbono orgânico total; DMG: diâmetro médio geométrico; DMP: diâmetro médio ponderado; Ds: Densidade do solo; Esf.: Esférico; Exp.: Exponencial; Lin: Linear; [1]$R^2$: coeficiente de determinação; [2]GDE%: grau de dependência espacial e; [3]VC: validação cruzada.

Quadro 3. Modelos e parâmetros estimados aos semivariogramas do MaP, MiP, VTP, Ds, DMG, DMP e COT do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

O grau de dependência espacial (GDE), classificado de acordo com Cambardella et al. (1994), que avalia em termos proporcionais o efeito pepita sobre o patamar ($C_0/(C_0+C_1)$, mostraram-se, de modo geral, forte dependência espacial (GDE < 25%) para os atributos estudados, todavia, o MaP na profundidade 0,10–0,20 m, VTP nas profundidades 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, DMP da profundidade de 0,0-0,05 m, silte na profundidade de 0,00-0,05 e RPS na profundidade 0,20-0,30 m mostraram moderada variabilidade (25 e 75 %) (Quadros 3 e 4). O atributo COT na camada de 0,0-0,05 m, MiP nas profundidades 0,0-,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m e Us nas profundidades 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m (Quadros 3 e 4) apresentaram efeito pepita puro, isto é, ocorreu variação aleatória dos atributos na área estudada, resultados semelhantes foram encontrados por Oliveira et al. (2013) que estudou solos sob diferentes usos na Amazônia.

Os resultados dos alcance da dependência espacial não apresentaram grandes variações, a argila foi o atributo de maior variação (26 a 54 m), seguido do DMG (alcance de 26 a 43 m) e areia (alcance entre 30 e 54 m), as demais apresentaram pequenas variações, o DMP variou de 31 a 39 m, já a Ds, MiP, MaP e VTP ficaram entre 20 a 30 m e COT, RSP, Us e silte entre 20 e 31 m (Quadros 3 e 4), semelhante aos resultados encontrados por Aquino et al. (2014 a) que estudou solos antropogênicos e não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. A informação sobre o alcance podem auxiliar no subsidio de futuros estudos envolvendo amostragem de solos no que se refere a densidade amostral (AQUINO et al., 2014 b).

| Parâmetros Geoestatísticos | RSP | Us (vol) | Areia | Silte | Argila |
|---|---|---|---|---|---|
| | Mpa | % | ----------g kg$^{-1}$---------- | | |
| | | 0,05-0,10 m | | | |
| Modelo | Exp | Exp | Esf | Esf | Exp |
| Efeito Pepita | 0,015 | 2,80 | 519 | 256 | 256 |
| Patamar | 0,121 | 17,74 | 2235 | 937 | 1942 |
| Alcance (m) | 20 | 20 | 30 | 23 | 26 |
| [1]$R^2$ | 0,90 | 0,91 | 0,97 | 0,95 | 0,84 |
| [2]GDE (%) | 12 | 16 | 23 | 27 | 13 |
| [3]VC% | 0,89 | 0,70 | 0,85 | 0,87 | 0,95 |
| | | 0,05-0,10 m | | | |
| Modelo | Exp | Lin | Exp | Exp | Exp |
| Efeito Pepita | 0,02 | - | 104 | 91 | 484 |
| Patamar | 0,09 | - | 1091 | 910 | 2245 |
| Alcance (m) | 34 | - | 54 | 31 | 51 |
| [1]$R^2$ | 0,97 | - | 0,96 | 0,94 | 0,99 |
| [2]GDE (%) | 22 | - | 9,5 | 10 | 21,6 |
| [3]VC% | 0,75 | - | 0,90 | 0,91 | 0,96 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 0,10-0,20 m | | | |
| Modelo | Exp | Lin | Exp | Exp | Exp |
| Efeito Pepita | 0,012 | - | 67 | 148 | 138 |
| Patamar | 0,110 | - | 1081 | 1539 | 1735 |
| Alcance (m) | 24 | - | 35 | 26 | 54 |
| [1]$R^2$ | 0,90 | - | 0,96 | 0,95 | 0,94 |
| [2]GDE (%) | 11 | - | 6 | 10 | 8 |
| [3]VC% | 0,87 | - | 0,94 | 0,78 | 0,94 |
| | | 0,20-0,30 m | | | |
| Modelo | Esf | Exp | Exp | Exp | Exp |
| Efeito Pepita | 0,044 | 1,72 | 129 | 449 | 356 |
| Patamar | 0,110 | 13,30 | 863 | 1880 | 3392 |
| Alcance (m) | 26 | 22 | 54 | 21 | 29 |
| [1]$R^2$ | 0,90 | 0,84 | 0,94 | 0,96 | 0,98 |
| [2]GDE (%) | 40 | 13 | 15 | 24 | 11 |
| [3]VC% | 0,89 | 0,62 | 0,91 | 0,76 | 0,89 |

RSP= resistência do solo a penetração; Ds: densidade do solo; Us (vol): umidade volumétrica do solo; MaP: macroporosidade; MiP: microporosidade; VTP: volume total de poros; Esf: Esférico; Exp: Exponencial; Lin: Linear; [1]EPP: efeito pepita puro; $R^2$: coeficiente de determinação; GDE%: grau de dependência espacial e; VC: validação-cruzada.

Quadro 1. Modelos e parâmetros estimados aos semivariogramas da resistência do solo a penetração (RSP), umidade volumétrica (Us), areia, silte e argila em diferentes profundidades em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

Os mapas da MaP e MiP (Figura 1) mostram que essas variáveis apresentaram distribuição com pouca relação entre si (Figura 1), entretanto relacionam-se com o VTP (Figura 2) com uma faixa marcante nas profundidades 0,10-,20 e 0,20-0,30 m provavelmente porque essa profundidade é pouco influenciada pelo manejo do cacau. Outro aspecto importante é que nas zonas de maior VTP maior os valores de densidade do solo, por outro lado, quanto maiores os teores de COT menores as densidade do solo (Figura 2 e 4) evidenciando a grande papel do carbono orgânico nesta variável em áreas de TPA, como ressaltado por Campos et al. (2012).

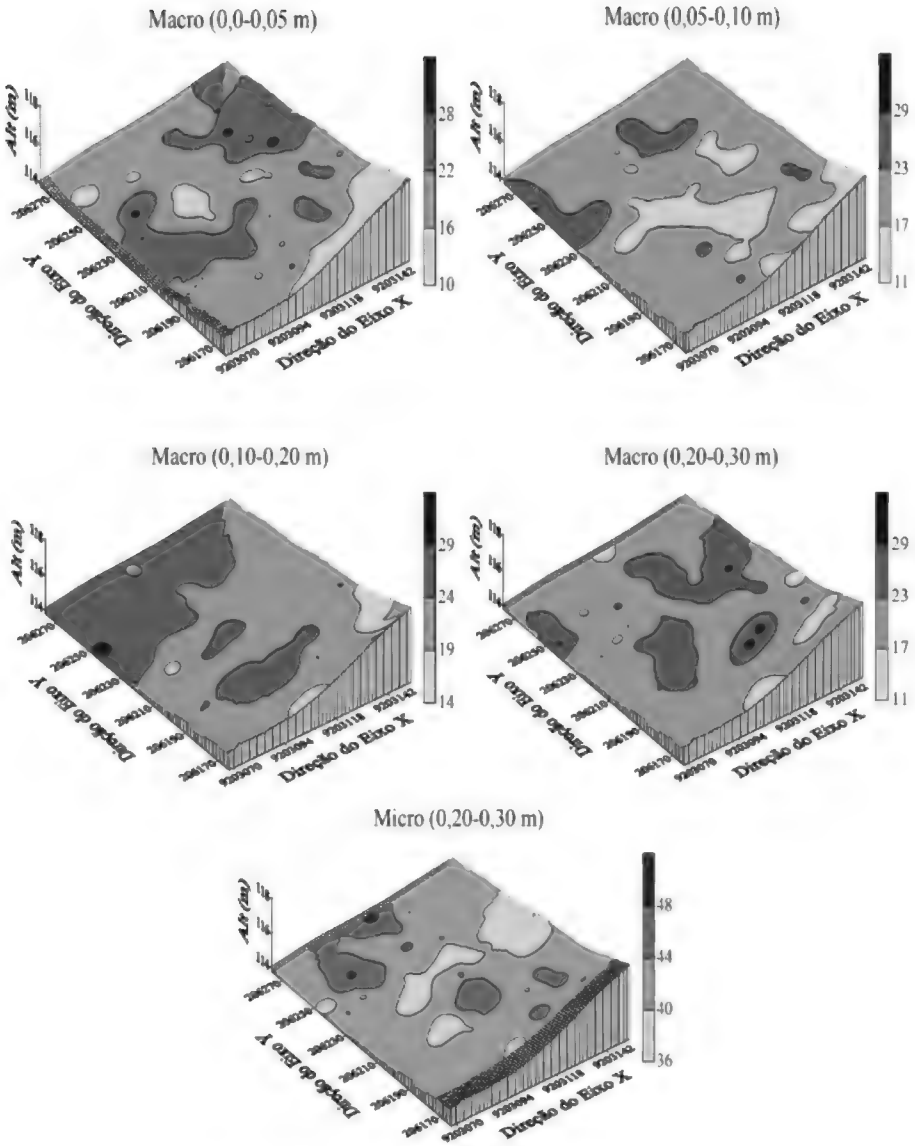



Figura 1. Mapas de krigagem da MaP nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 e MiP na profundidade de 0,20-0,30 m em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

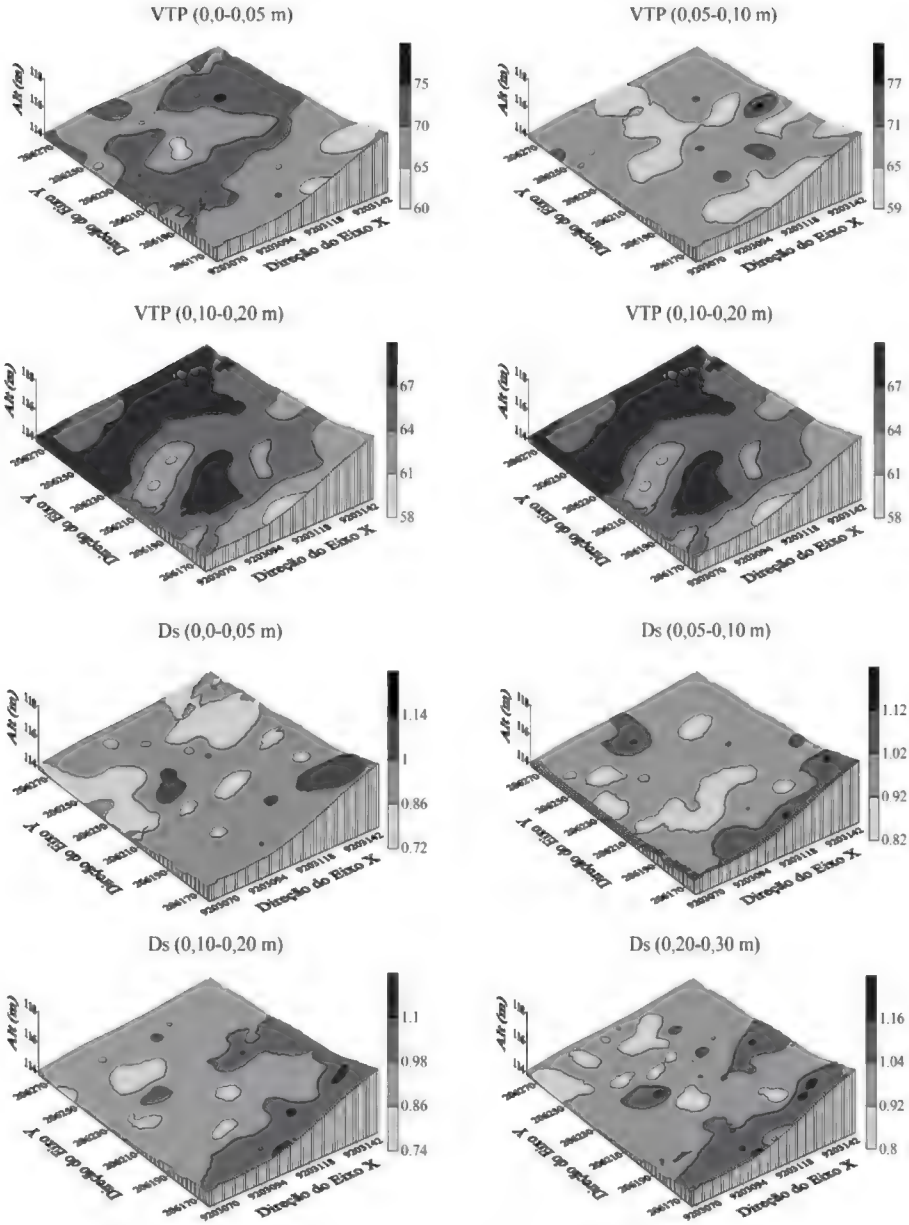



Figura 2. Mapas de krigagem do VTP e Ds nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,010; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

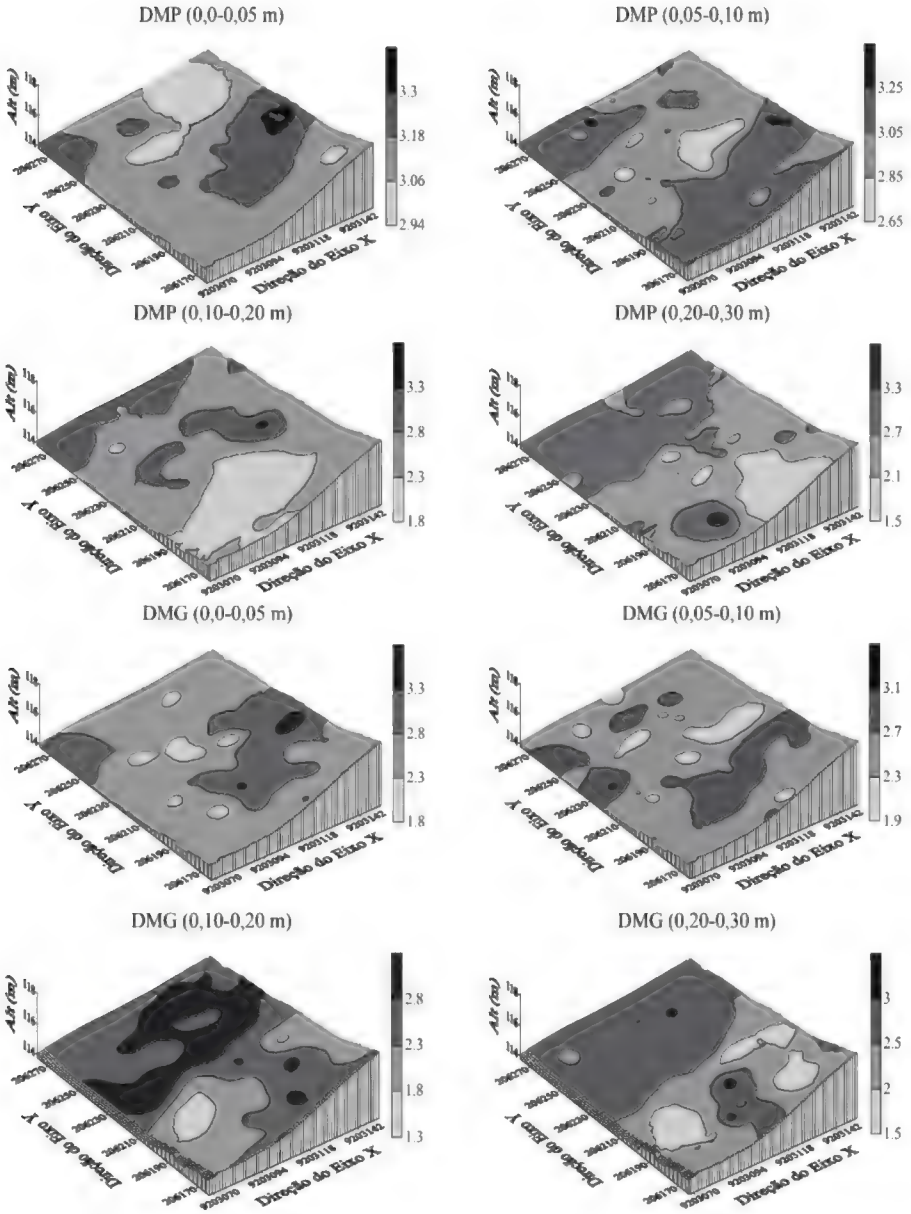



Figura 3. Mapas de krigagem do DMP e DMG nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,010; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

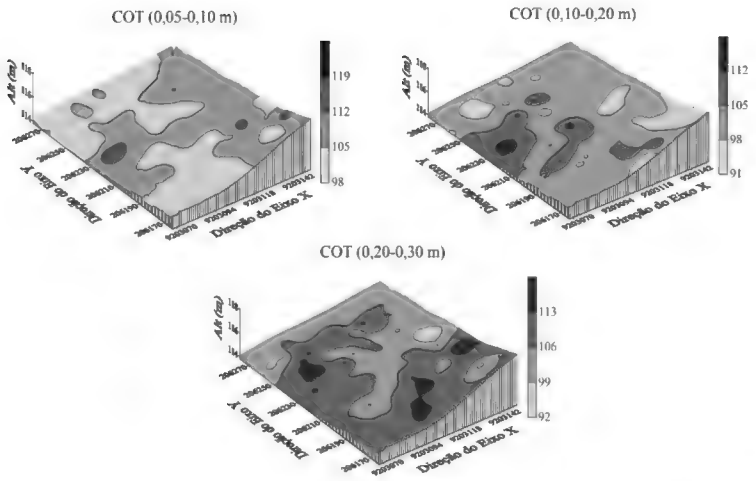



Figura 4. Mapas de krigagem do COT nas profundidades de 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

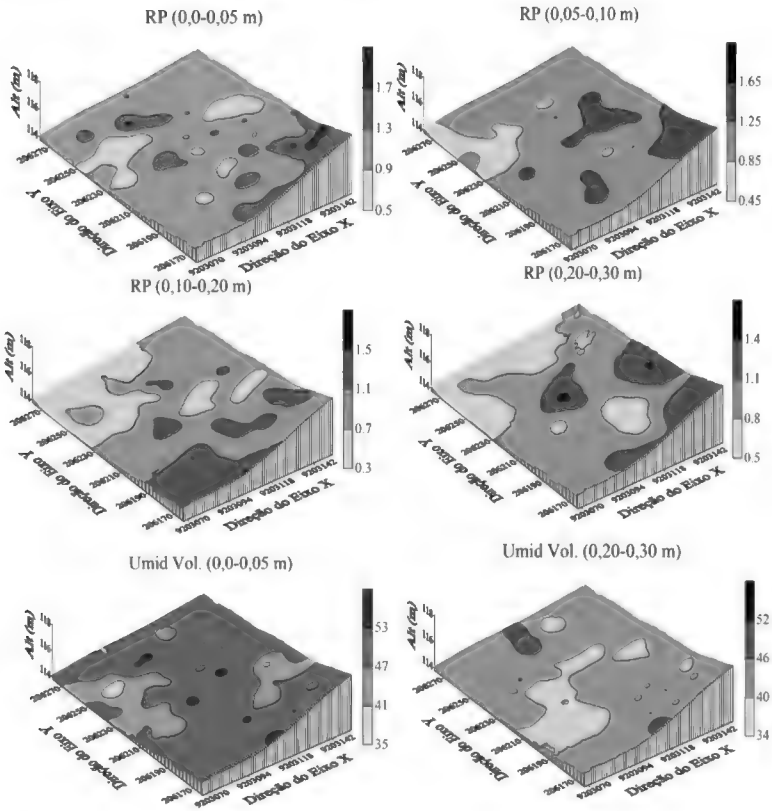



Figura 5. Mapas de krigagem da resistência do solo a penetração (RP) nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 e umidade volumétrica profundidades de 0,00-0,05 e 0,20-0,30 em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

Os mapas de krigagem dos índices da estabilidade de agregados (DMG e DMP) nas diferentes profundidades apresentam resultados semelhantes entre si (Figura 3). Verifica-se também que as manchas nos mapas de DMG e DMP são coincidentes com o do teor COT (Figura 4) este fato também foi observado por Souza et al., (2009) e Coutinho et al., (2010), para Vieira et al., (2011) estes resultados mostram a importância do carbono na agregação do solo.

Os mapas de krigagem da resistência do solo a penetração (Figura 5) apresentam comportamento semelhante a densidade do solo (Figura 2) indicando que quanto menor a resistência do solo a penetração menor a densidade do solo concordando com resultados encontrados por Alho et al. (2014) em estudos em Argissolos e Cambissolos na região Sul do Amazonas.

## 4 I CONCLUSÕES

As densidades do solo, volume total de poros, diâmetro médio geométrico e diâmetro médio ponderado apresentaram-se dependentes da quantidade de carbono orgânico total na área de TPA;

Com o aumento da densidade do solo e resistência do solo a penetração e coincidente com baixos teores de COT e diminuição da MiP e VTP em áreas de TPA;

Em áreas de TPA a resistência do solo a penetração são influenciados pela umidade volumétrica e pelo aumento dos teores de argila em profundidade, este fato e explicado que com o aumento da profundidade ultrapassa-se o horizonte antrópico e adentra os horizontes de natureza mais próxima ao material de origem.

## REFERÊNCIAS

ALHO, L.C.; CAMPOS, M.C.C.C.; SILVA, D.M.P.; MANTOVANELLI, B.C.; SOUZA, Z.M. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e estoque de carbono em Cambissolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Florestal, v.** 44, p. 246-254, 2014

AQUINO, R.E.; CAMPOS, M.C.C.; MARQUES JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, I.A.; MANTOVANELLI, B.C.; SOARES, M.D.R. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em latossolo sob floresta nativa e pastagem na Região de Manicoré, Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 397-406, 2014b.

AQUINO, R.E.; CAMPOS, M.C.C.; OLIVEIRA, I.A.; MARQUES JÚNIOR, J.; SILVA, D.M.P.; SILVA. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos antropogênico e não antropogênico na região de Manicoré, AM. **Bioscience Journal,** v.30, p. 988-997, 2014a.

BRADFORD, J.M. Penetrability. In: KRUTE, A., ed. Methods of soil analysis. 2. ed. Madison, **American Society of Agronomy,** p. 463-478, 1986.

BURROUGH, P.A., McDONNEL, R.A. Principles of geographical information systems. Oxford, **Oxford University Press**, 230p. 2000.

CAJAZEIRA, J. ASSIS JUNIOR, R. N. Variabilidade espacial das frações primárias e agregados de um Argissolo no estado do Ceará. **Revista Ciência Agrônomica,** v. 42, p. 258-267, 2011.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T.B.; KARLEM, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPA, A.E. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. **Soil Science Society American Journal,** v. 58, p. 1501-1511, 1994.

CAMPOS, M.C.C.; RIBEIRO, M.R.; SOUZA JÚNIOR, V.S.; RIBEIRO FILHO, M.R.; SOUZA, R. V.C.C.; ALMEIDA, M.C. Caracterização e Classificação de Terras Pretas Arqueológicas na região do Médio Rio Madeira. **Bragantia,** v. 70, p. 18-27, 2011.

CAMPOS, M.C.C.; SANTOS, L.A.C.; SILVA, D.M.P.; MANTOVANELLI, B.C.; SOARES, M.D.R. Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. **Agro@mbiente On-line,** v. 6, p. 102-109, 2012.

CHAVES, L.H. G. & FARIAS, C.H.A. Variabilidade espacial do estoque de carbono nos Tabuleiros Costeiros da Paraíba: Solo cultivado com cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v. 3, p. 20-25, 2008.

COUTINHO, F.S.; LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; JUNIOR, D.J.R.; TORRES, J.L. R. Estabilidade de agregados e distribuição do carbono em Latossolo sob sistema plantio direto em Uberaba, Minas Gerais. **Comunicata Scientiae**, v. 2, p. 100-105, 2010.

CUNHA, T.J.F.; MADARI, B.E.; BENITES, V.M.; CANELLAS, L.P.; NOVOTNY, E.H.; MOUTTA, R.O.; TROMPOWSKY, P.M.; SANTOS, G.A. Fracionamento químico da matéria orgânica e características de ácidos húmicos de solos com horizonte a Antrópico da Amazônia (Terra Preta). **Acta Amazonica,** v. 37, p. 91-98, 2007.

DIGGLE, P.; RIBEIRO JUNIOR. P. J. Model- based geostatistics. New York: Spring, 2007.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Brasília, 2013. 353p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo.** 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1997.

HICKMANN, C.; COSTA, L.M.; SCHAEFER; C.E.G.R.; FERNANDES, R.B.A.; ANDRADE, C.L.T. Atributos físico-hidricos e carbono orgânico de um Argissolo após 23 anos de diferentes manejos. **Revista Caatinga**, v. 25, p. 128-136, 2012.

ISAAKS, E.H. & SRIVASTAVA, R.M. An introduction to applied geoestatistics. **New York: Oxford University Press,** p.561, 1989.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.) Methods of soil analysis. Part I. Physical and minerological methods. Madison, **WI: Soil Science Society of America,** p. 425-442, 1986.

MELO, V.F.; SCHAEFER, C.E.G.R. Matéria orgânica em solos desenvolvidos de rochas máficas no nordeste de Roraima. **Acta Amazonica,** p. 39, p. 53-60, 2009.

MINITAB Release 14.1, **Statistical Software**. 2000.

OLIVEIRA, I.A.; CAMPOS, M.C.C.; SOARES, M.D.R.; AQUINO, R.E.; MARQUES JÚNIOR, J.; NASCIMENTO, E.P. Variabilidade espacial de atributos físicos em um cambissolo háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** v. 37, p. 1103-1112, 2013.

ROBERTSON, G.P. **GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide.** Plainwell: Gamma Design Software, 1998.152p.

SANTOS, L.A. C.; CAMPOS, M.C.C.; BERGAMIN, A.C.; SILVA, D.M.P.; MENDONÇA JÚNIOR, A.F. Caracterização física de seis sítios de Terras Pretas Arqueológicas na região de Apuí-AM. **Revista Verde,** v. 6, p. 167-174, 2011.

SANTOS, L.A.C.; CAMPOS, M.C.C.; AQUINO, R.E.; BERGAMIN, A.C.; SILVA, D.M.P.; MARQUES JUNIOR, J.; FRANCA, A.B.C. Caracterização de terras pretas arqueológicas no sul do estado do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** v. 37, p. 825-836, 2013.

SDS - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Relatório técnico síntese dos diagnósticos: Área estadual sul de Apuí e Manicoré.** Manaus, 2004. 20p.

SILVA, R.F.; BORGES, C.D.; GARIB, D.M.; MERCANTE, F.M. Atributos físicos e teor de matéria orgânica na camada superficial de um Argissolo vermelho cultivado com mandioca sob diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 32, p. 2435-2441, 2008.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; SÁENZ, C.M.S. spatial variability of aggregate stability in Latosols under sugarcane. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo,** v. 33, p. 245-253, 2009.

SPERA, S.T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R.S.; TOMM, G.O. Atributos físicos de um Hapludox em função de sistemas de produção integração lavoura-pecuária (ILP), sob plantio direto. **Acta Scientiarum Agronomy,** v. 32, p. 37-44, 2010.

VAUCLIN, M.; VIEIRA, S.R.; VACHAUD, G. & NIELSEN, D.R., The use of cokriging with limited field soil observations. **Soil Science Society American Journal,** v. 47, p. 175-184. 1983.

VIANA, E.T.; BATISTA, M.A.; TORMENA, C.A.; COSTA, A.C.S.; INOUE, T.T. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo,** v. 35, p. 2105-2114, 2011.

VIEIRA, S.R.; DECHEN, S.C.F.; SIQUEIRA, G.M.; DUFRANC, G. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos relacionados com o estado de agregação de dois Latossolos cultivados no sistema de semeadura direta. **Bragantia**, v. 70, p. 185-195, 2011.

VIEIRA, S.R.; GARCIA, M.A.G.; GONZÁLEZ, A.P.; SIQUEIRA, G.M. Variabilidade espacial e temporal do teor de água do solo sob duas formas de uso. **Bragantia**, v. 69, p. 181-190, 2010.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. Applications of soil physics. **New York: Academic Press**, cap. 2, p.319-344, 1980.

WOJCIECHOWSKI, J.C.; SCHUMACHER, M.V.; PIRES, C.A.F.; MADRUGA, P. R.A.; KILCA, R.V.; BRUN, E.J.; SILVA, C.R.S.; VACCARO, S.; RONDON NETO, R.M. Geoestatística aplicada ao estudo das características físico-químicas do solo em áreas de floresta estacional decidual. **Ciência Florestal, v.** 19, p. 383-391, 2009.

YEOMANS, J.C.; BREMMER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in S.Sci. Plant Analysis,** v. 19, p. 1467-1476, 1988.

# CAPÍTULO 12

# SPATIAL VARIABILITY OF AGGREGATES AND ORGANIC CARBON UNDER THREE DIFFERENT USES OF INDIAN BLACK EARTH IN SOUTHERN AMAZONAS

*Data de aceite: 18/05/2021*
*Data de submissão: 11/05/2021*

**Ivanildo Amorim Oliveira**
Instituto Federal de Rondônia
Ariquemes – Rondônia
https://orcid.org/0000-0003-2299-3229

**Romário Pimenta Gomes**
Universidade Estadual Paulista
Jaboticabal – São Paulo
https://orcid.org/0000-0003-0663-0962

**Milton César Costa Campos**
Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal da Paraíba
Areia - Paraíba
https://orcid.org/0000-0002-8183-7069

**Marcelo Dayron Rodrigues Soares**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
https://orcid.org/0000-0003-2942-5320

**Douglas Marcelo Pinheiro Silva**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://orcid.org/0000-0001-8147-5726

**José Maurício Cunha**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
https://orcid.org/0000-0003-4057-1708

**Laercio Santos Silva**
Universidade Estadual Paulista
Jaboticabal – São Paulo
https://orcid.org/0000-0002-0805-1318

**Wildson Benedito Mendes Brito**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
https://orcid.org/0000-0002-4267-5992

**ABSTRACT:** Indian Black Earths (IBEs) are distributed throughout the Amazon. They are characterized by their high chemical fertility and agricultural potential. IBEs have high organic carbon, favouring the improvement of soil structure. This work aimed to evaluate the aggregates and organic carbon (OC) spatial variability in different IBEs in southern Amazonas. We evaluated the organic carbon spatial variability, mean weight diameter (MWD), soil bulk density (ρb) and aggregate classes under three uses of soil: pasture, cocoa, and coffee. We collected 528 soil samples in a point grid according to its use at two depths: 0.0-0.05 m and 0.10-0.20 m. Results were subjected to variance, descriptive, and geostatistical analyses. We concluded that the soil use influenced the IBEs physical attributes soil behavior, concentrating the higher values of CO, aggregates > 2.00 mm, and MWD at 0.0-0.05 m in relation to ρb and aggregates < 2.00 mm where the higher values were the ones at 0.10-0.20 m. Aggregates< 2.00 mm (0.10-0.20 m) and OC (0.0-0.05 m) did not show spatial dependence, while the class of aggregates > 2.00

mm was the only attribute which represented to be a natural characteristic of the soil, with a strong spatial dependence, independently the land use and depth. There was no spatial relationship between the attributes studied and the geomorphic diversity.
**KEYWORDS:** Spatial dependence, Aggregate classes, Soil aggregation, Land use.

## VARIABILIDADE ESPACIAL DE AGREGADOS E CARBONO ORGÂNICO SOB TRÊS DIFERENTES USOS DE TERRA PRETA DE ÍNDIO NO SUL DO AMAZONAS

**RESUMO:** As Terras Pretas de Índio (TPIs) encontram-se distribuídas por toda a Amazônia. Elas são caracterizadas pela alta fertilidade química e potencial agrícola. As TPIs possuem alto carbono orgânico, favorecendo a melhoria da estrutura do solo. Este trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade espacial dos agregados e do carbono orgânico (CO) em diferentes usos de TPIs no sul do Amazonas. Foi avaliado a variabilidade espacial do carbono orgânico, diâmetro médio ponderado (DMP), densidade do solo (ρb) e as classes de agregados sob três usos do solo: pastagem, cacau e café. Nas áreas estudas construiu-se um grid regular de pontos, de acordo com o uso do solo e nas profundidades, 0-0,05 m e 0,10-0,20 m, totalizando 528 amostras de solo. Os resultados foram submetidos à análise de variância, descritiva e geoestatística. O uso do solo influenciou o comportamento dos atributos físicos das TPIs, concentrando os valores mais altos de CO, agregados > 2.00 mm e DMP na profundidade 0,0-0.05 m em relação a ρb e agregados <2.00 mm, que assumiram valores mais altos na profundidade 0,10-0,20 m. Agregados < 2,00 mm (0,10-0,20 m) e CO (0,0-0,05 m) não apresentaram dependência espacial, enquanto a classe de agregados > 2,00 mm foi o único atributo que representou uma característica natural do solo, com forte dependência espacial, independentemente do uso e profundidade do solo. Não houve relação espacial entre os atributos estudados e a diversidade geomórfica.
**PALAVRAS-CHAVE:** Dependência espacial, Classes de agregados, Agregação do solo, Uso da terra.

## 1 I INTRODUCTION

Spatial variability of soil physical attributes occurs naturally due to factors and processes of soil formation and geomorphic expressions (CAMARGO et al., 2010). In the case of Indian Black Earths (IBEs), several factors contributed to the spatial discontinuity of physical attributes such as burial and burning of ceramic artifacts and animal bones. In addition, this discontinuity was conditioned by the trampling of indigenous peoples who inhabited these sites (AQUINO et al., 2014a; OLIVEIRA et al., 2015).

Besides the natural variability, land use and management in agriculture play an additional source of variation (OLIVEIRA et al., 2013). This use and management influence carbon distribution in different soil fractions and cause short and/or long-term changes (MARQUES et al., 2015). Deforestation and agriculture change soil properties, such as the aggregate stability (CAMPOS et al., 2013), altering porous space, aggregate size, water movement, and soil density (VIEIRA et al., 2011). Several studies have identified that the

smaller the organic carbon content, higher the soil disintegration (CAMPOS et al., 2011).

Another factor that influences spatial variability of soil physical attributes is the curvature of land surface (CAMARGO et al., 2010). This curvature conditions the movement of water and the mass flow in the soil along the landscape. In this aspect, it is necessary to use methodologies to identify spatial discontinuity allowing soil characterization for sustainable use and management (CAJAZEIRA and ASSIS JÚNIOR, 2011). In this aspect, geostatistics allows the detection and a better understanding spatial variability (VIEIRA, 2000).

The State of Amazonas has a great territorial extension and geomorphological diversity. Thus, the use of geostatistics becomes an extremely viable practice due to its low cost and high representativeness of local conditions. Despite its applicability, few studies using geostatistics were carried out in the Amazonian soils, where some of them can be highlighted like the Campos et al (2011), Aquino et al. (2014a), Oliveira et al. (2015), and Alho et al. (2016). Thus, there is a need to characterize the soil and its use in the Amazon region. In this way, the objective of this work was to evaluate the spatial variability of aggregates and organic carbon in Terra Preta de Indio (Indian Black Earth) under different land uses in southern Amazonas.

## 2 I MATERIAL AND METHODS

The study was carried out in the southern part of the Amazonas State, in Apuí and Manicoré at the roadside BR 230, the Transamazônica highway. Three areas of Indian Black Earth (IBE) were selected where cocoa, coffee, and pasture were growing. The IBE area with pasture (7 years of pasture growth) is located in Manicoré (Latitude 7° 59' 22" S, Longitude 61° 39' 51.2" W). This pasture is characterized by the use of brachiaria (*Brachiaria brizanta*) which supports one animal unit per hectare in an extensive system (Figure 1). The soil from this area was classified as Eutrophic Red-Yellow Argisol (Embrapa, 2013) or Red Ultisol (Soil Survey Staff, 2014), where the region primary ecosystem is Dense Tropical Forest. This type of soil developed geologically from sandstones of the Içá Formation.

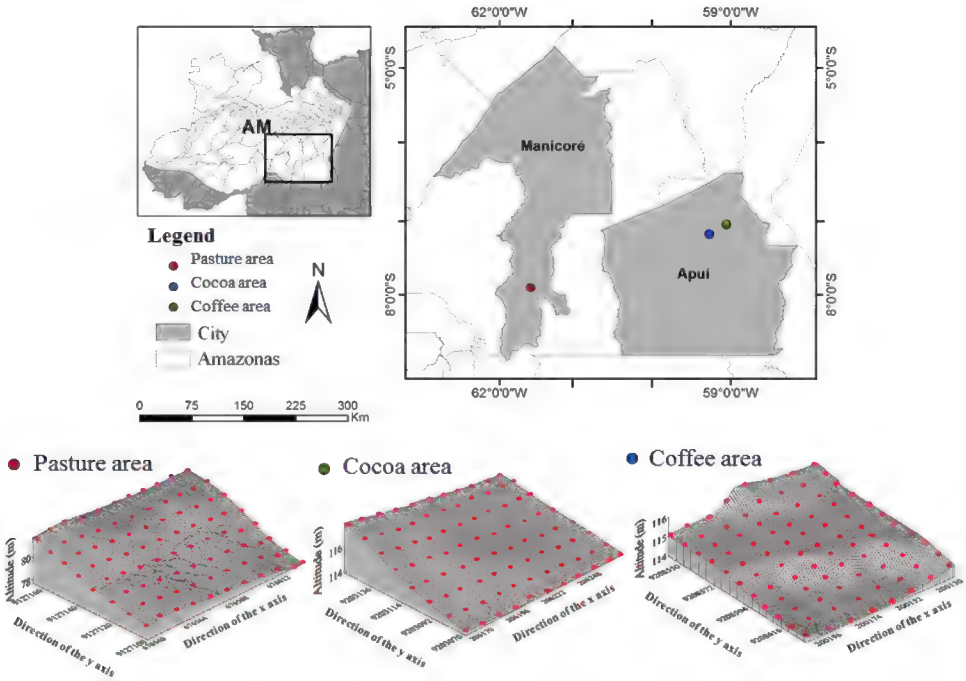



Figure 1. Map of location and digital elevation model of the studied areas in Manicoré and Apuí, AM.

The IBEs areas where cocoa and coffee were growting in Apuí (Latitude 7° 12' 05" S, Longitude 59° 39' 35" W). This soil was classified as Eutrophic Yellow Argisol, according to Embrapa (2013) or Yellow Ultisol (Soil Survey Staff, 2014). This soil is composed of sandstones of the Beneficial geological formation, which presents a clayey tertiary package and primary covered with Dense Tropical Forest.

The IBE area with cocoa (8 years of cocoa growth) was previously grown with rice, corn, beans, and watermelon (Figure 1). The area of IBE with coffee (6 years of coffee growth) was previously under pasture. Cocoa and coffee were manually cultivated.

Soil samples from the study areas were collected in a grid (Figure 1). The sampled pasture area was 4,480 $m^2$ (56 x 80 m), in a grid of 88 points spaced 6 x 8 m. The sampling area in both coffee and cocoa areas was 4,228 $m^2$ in a grid of 88 points spaced 8 x 8 m. Soil samples were collected at two depths in small trenches at depths 0-0.05 m and 0.10-0.20 m. At total, we collected 528 soil samples. The points of the sample grids were georeferenced to construct the digital elevation model. The equipment used in the georeferencing was the GPSMAP 76CS (Garmin International, USA) with accuracy of <10 m.

Texture analysis was performed using 0.1 mol $L^{-1}$ NaOH solution as a chemical dispersant and mechanical stirring in high-speed apparatus for 15 min. Clay fraction was determined by the pipette method, the sand, by sieving, and the silt calculated by the

difference (Embrapa, 1997). The results are presented at Table 1.

| Layers | Coffee | | | Cocoa | | | pasture | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ----------g kg$^{-1}$---------- | | | | | | | | |
| | Sand | Silt | Clay | Sand | Silt | Clay | Sand | Silt | Clay |
| Superficial | 364.65 | 617.37 | 17.98 | 221.10 | 572.83 | 204.52 | 711.13 | 235.49 | 51.18 |
| Sub superficial | 344.32 | 638.52 | 17.16 | 187.97 | 537.86 | 274.23 | 713.76 | 205.94 | 73.91 |

Superficial = 0.0-0.05 m, Sub superficial = 0.10-0.20 m

Table 1. IBE areas soil texture under different managements.

Soil bulk density ($\rho_b$) was determined in cylinders of 5.57 cm of diameter and 4.1 cm in height. Colected soil samples were oven-dried at 105-110 °C for 48 hours (Embrapa 1997). Organic carbon (OC) was determined by the Walkley-Black method, modified by Yeomans and Bremner (1998).

Soil samples for aggregate determination were removed in blocks, which were air dried and passed through 9.52 mm and 4.76 mm sieves. Then, the aggregates retained at 4.76 mm sieve were used in the wet aggregates stability analysis, placed on a set of sieves with 2.0 mm, 1.0 mm, 0.5 mm, 0.25 mm, 0.105 mm, and 0.053 mm sieving, subjecting them to vertical oscillations. After fifteen minutes or 15 min, portions retained in each sieve were transferred to aluminum pots with the aid of water jets, and then dried at 105 °C for 24 hours for later weighing (KEMPER and CHEPIL, 1965). Results were expressed as Mean Weight Diameter (MWD), percentage of aggregates greater than 2 mm (% > 2 mm) and percentage of aggregates smaller than 2 mm (% < 2 mm).

Results were submitted to analysis of variance and Tukey's mean separation test ($p < 0.05$). We also did the descriptive analysis (mean, median and coefficient of variation) of these results and the evaluation of their normality, by using the Kolmogorov-Smirnov test. Finally, spatial variability was evaluated using geostatistics. For this evaluation, the experimental semivariogram was estimated according to equation (1).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \qquad (1)$$

Where: $\gamma(h)$ – semivariance value to a "h" distance; N(h) – number of pairs involved in the semivariance calculus; $Z(x_i)$ – value of Z at $x_i$; $Z(x_i+h)$ – value of Z separated by a distance "h" at $x_i$.

Both spherical and exponential mathematic models were adjusted to the semivariograms. This adjustment was made based on the number of pairs involved in the semivariogram, sum of the square of the residuals (SQR), presence of the plateau (BURROUGH and MCDONNEL, 2000) and coefficient of determination ($R^2$). Then, the

cross-validation (CV) technique was used to obtain the correlation coefficient (VIEIRA, 2000). Subsequently, the degree of spatial dependence (DSD) was succeeded by the relation between the nugget effect ($C_0$) and semivariogram plateau ($C_0$+$C_1$). Attributes were considered with strong DSD when the relation was [$C_0$/($C_0$+$C_1$) ≤ 25%], moderate DSD [($C_0$/($C_0$+$C_1$) between 25 and 75%] and weak DSD when [($C_0$/($C_0$+$C_1$)> 75% (CAMBARDELLA et al., 1994). Finally, we performed variable value distribution estimates to points not sampled in the grid by kriging.

Descriptive and variance analyzes were performed using the Minitab program, while the geostatistical analysis using the Surfer program (Golden Software Inc., 1999).

## 3 I RESULTS AND DISCUSSION

The results referring to the descriptive statistical analysis and soil attributes mean test are shown in Table 2. The studied variables values of mean and median were similar among each other at the different soil use systems. This closeness indicated a normal distribution of data (CRUZ et al., 2010; CAMPOS et al., 2013a). No. However, the normality was only observed in all variables at 0.10-0.20 m in the soil grown with cocoa. We also observed that only the aggregates > 2.00 mm class presented normal distribution in all soil uses, regardless of depth. The normality of results obtained in this study was similar to other researches that studied soils with pastures (OLIVEIRA et al., 2015).

In general, the behavior of physical attributes evaluated in pasture and coffee areas were closer than the ones observed in soil where cocoa was grown (Table 2). At the three soil uses both Mean Weight Diameter (MWD) and aggregates class > 2.00 mm, obtained the highest values and they did not differ statistically at 0.0-0.05 m, evidencing few influence in this attributes influence. However, the decreased of MWD and aggregates > 2.00 mm at 0.10-0.20 mm was due to the smaller amount of CO, given that the magroaggregates genesis is closely associated to the CO content, mainly up to a 0.05-0.20 m depth (GARCIA et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2015; SILVA et al., 2016).

Soil bulk density ($\rho_b$) and aggregates class < 2.00 mm were the most sensitives physical atributes to the soil use type, mainly at 0.0-0.05 m, where we could found statistical difference to the adopted management (Table 2). The $\rho_b$ was higher at pasture due to the livestock and intensive animal trampling, corroborating with Oliveira et al. (2015) and Silva et al. (2016) results. The smaller $\rho_b$ in the cocoa and coffee soil is due to the big amount of cultural residues, like branches, leaves, and fruits, added to the soil in each crop cycle (Silva et al., 2016). In this sense, Steinbeiss et al. (2009) affirm the lower soil density in these areas happen not only due to the high amount of carbon, but also due to the intense biologic activity (fauna and roots).

| Attributes | Statistics | Pasture | Coffee | Cocoa | Pasture | Coffee | Cocoa |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Surface (0.0 – 0.05 m) | | | Sub-surface (0.10 – 0.20 m) | | |
| MWD (mm) | Mean | 3.14 A | 3.14 A | 3.14 A | 3.01 A | 2.90 A | 2.53 B |
| | Median | 3.16 | 3.14 | 3.15 | 3.07 | 2.91 | 2.63 |
| | CV (%)[1] | 3.14 | 3.18 | 4.45 | 6.55 | 4.82 | 17.39 |
| | d[2] | 0.03 | 0.20* | 0.09* | 0.01 | 0.20* | 0.20* |
| OC (g $kg^{-1}$) | Mean | 34.26 B | 38.96 B | 55.62 A | 33.46 A | 33.83 A | 31.66 B |
| | Median | 34.25 | 37.25 | 54.71 | 33.50 | 35.19 | 32.35 |
| | CV (%) [1] | 4.06 | 29.85 | 17.70 | 1.56 | 19.59 | 17.37 |
| | d[2] | 0.15* | 0.03 | 0.20* | 0.15* | 0.20* | 0.15* |
| $\rho_b$ (Kg $dm^{-3}$) | Mean | 1.29 A | 1.08 B | 0.89 C | 1.17 A | 1.20 A | 0.93 B |
| | Median | 1.30 | 1.09 | 0.89 | 1.16 | 1.23 | 0.92 |
| | CV (%) [1] | 9.03 | 9.25 | 11.23 | 9.29 | 19.16 | 8.42 |
| | d[2] | 0.15* | 0.20* | 0.02 | 0.15* | 0.001 | 0.20* |
| > 2.00 mm (%) | Mean | 91.96 A | 90.60 A | 90.51 A | 86.54 A | 81.58 B | 76.91 C |
| | Median | 92.49 | 91.26 | 90.72 | 88.59 | 81.74 | 76.59 |
| | CV (%) [1] | 4.43 | 4.95 | 5.80 | 8.91 | 8.05 | 13.27 |
| | d[2] | 0.14* | 0.08* | 0.20* | 0.12* | 0.20* | 0.20* |
| < 2.00 mm (%) | Mean | 5.57 B | 7.56 AB | 9.48 A | 11.04 B | 13.83 B | 23.08 A |
| | Median | 4.45 | 6.65 | 9.28 | 9.49 | 12.95 | 23.41 |
| | CV (%) [1] | 67.99 | 53.04 | 55.37 | 59.51 | 50.25 | 44.23 |
| | d[2] | 0.17* | 0.01 | 0.20* | 0.11* | 0.20* | 0.20* |

Means followed by the same capital letter in the same depth line do not differ statistically from each other by the Tukey test ($p < 0.05$). [1]CV: coefficient of variation. [2]d: Kolmogorov-Smirnov normality test ($p < 0.05$).

Table 2. Mean and descriptive statistics test of Mean Weight Diameter (MWD), organic carbon (OC), soil density ($\rho_b$), aggregate class greater than 2 mm (> 2 mm), aggregate class smaller than 2 mm (< 2 mm) in Indian Black Earth (IBE) areas under different managements.

According to the classification proposed by Warrick and Nielsen (1980), only aggregates < 2.00 mm in pasture presented high coefficient of variation (CV) at 0.0-0.05 m, while MWD, $\rho_b$, and aggregates > 2.00 mm presented low variability in the three soil uses. However, the variability was moderate for the MWD and aggregates > 2.00 mm in the coffee area and for $\rho_b$ in the soil cultivated with cocoa. The OC observed in the pasture at the two studied depths presented low variability, while the variability was mild in the areas with coffee and cocoa. The decrease of $\rho_b$, MWD and OC in pasture was also observed in Alho et al. (2016) articles. Campos et al. (2013b) reported low variability for aggregates > 2.00 mm in Red Argisol, while Aquino et al. (2015) found low and medium variability for aggregates < 2.00 mm when the depth increased.

We observed a spatial dependence between depth and land use in most of the studied attributes (Table 3). This dependence can be observed in the semivariograms of

Figure 2.

The exponential model was predominant for all attributes, depths and soil uses (Table 3). Only the exponential model adjusted to the spatial dependence for $\rho_b$ and aggregates < 2.00 mm, regardless land depth and use. However, there is an exception done to aggregates < 2.00 mm in the soil use with pasture at 0.10-0.20 m, where it was observed absence of spatial dependence (pure nugget effect – PNE), behavior also verified to OC at 0.0-0.05 m in the cocoa area. It is worth noting the absence of spatial dependence in these variables does not necessary means absence of variance, but the incapability of adjustment the semivariogram model (CAMBARDELLA et al., 1994; VIEIRA, 2000).

| Attributes | Parameters | Pasture | Coffee | Cocoa | Pasture | Coffee | Cocoa |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Surface (0.0 – 0.05 m) | | | Sub-surface (0.10 – 0.20 m) | | |
| MWD (mm) | Model | Exp | Exp | Sp | Sp | Exp | Sp |
| | Nugget | 0.00007 | 0.002 | 0.02 | 0.001 | 0.003 | 0.08 |
| | Plateau | 0.0007 | 0.01 | 0.05 | 0.03 | 0.03 | 0.26 |
| | Reach (m) | 23.00 | 22.80 | 39.40 | 16.60 | 18.90 | 38.10 |
| | $R^2$ | 0.88 | 0.87 | 0.97 | 0.73 | 0.92 | 0.99 |
| | SDD (%) | 10.44 | 20.00 | 40.00 | 3.00 | 10.00 | 30.76 |
| | CV | 0.77 | 1.00 | 0.88 | 0.98 | 0.72 | 0.92 |
| OC (g $kg^{-1}$) | Model | Sp | Exp | PNE | Sp | Exp | Exp |
| | Nugget effect | 0.84 | 86.40 | - | 0.14 | 25.47 | 3.70 |
| | Plateau | 1.64 | 172.90 | - | 0.28 | 56.46 | 40.25 |
| | Reach (m) | 41.80 | 31.50 | - | 43.80 | 37.30 | 14.70 |
| | $R^2$ | 0.97 | 0.74 | - | 0.97 | 0.91 | 0.95 |
| | SDD (%) | 51.00 | 49.97 | - | 50.00 | 45.11 | 9.19 |
| | CV | 0.97 | 0.90 | - | 0.97 | 0.95 | 0.77 |
| $\rho_b$ (Kg $dm^{-3}$) | Model | Exp | Exp | Exp | Exp | Exp | Exp |
| | Nugget effect | 0.001 | 0.005 | 0.00001 | 0.001 | 0.002 | 0.0028 |
| | Plateau | 0.01 | 0.01 | 0.009 | 0.01 | 0.01 | 0.0099 |
| | Reach (m) | 25.80 | 48.90 | 17.80 | 21.90 | 15.60 | 25.80 |
| | $R^2$ | 0.91 | 0.96 | 0.97 | 0.82 | 0.71 | 0.98 |
| | SDD (%) | 10.00 | 50.00 | 0.11 | 10.00 | 20.00 | 28.28 |
| | CV | 0.98 | 0.95 | 1.00 | 0.99 | 0.70 | 0.99 |
| >2.00 mm (%) | Model | Exp | Sp | Exp | Exp | Exp | Sp |
| | Nugget effect | 0.01 | 0.89 | 6.10 | 4.30 | 6.30 | 0.10 |
| | Plateau | 12.10 | 25.51 | 50.11 | 54.30 | 62.14 | 96.00 |
| | Reach (m) | 25.00 | 14.30 | 28.80 | 11.50 | 19.80 | 12.40 |
| | $R^2$ | 0.86 | 0.76 | 0.92 | 0.92 | 0.90 | 0.73 |
| | SDD (%) | 0.08 | 3.48 | 12.07 | 7.92 | 10.13 | 0.10 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CV | 0.78 | 0.76 | 0.81 | 0.76 | 0.75 | 0.73 |
| <2.00 mm (%) | Model | Exp | Exp | Exp | PNE | Exp | Exp |
| | Nugget effect | 0.01 | 6.74 | 6.50 | - | 35.90 | 8.10 |
| | Plateau | 8.80 | 17.15 | 51.17 | - | 94.16 | 92.92 |
| | Reach (m) | 16.00 | 25.70 | 28.50 | - | 38.50 | 21.60 |
| | $R^2$ | 0.97 | 0.86 | 0.92 | - | 0.89 | 0.93 |
| | SDD (%) | 0.11 | 39.90 | 12.70 | - | 38.12 | 8.71 |
| | CV | 0.75 | 0.93 | 0.79 | - | 0.74 | 0.91 |

PNE: Pure Nugget Effect; Exp: Exponential; Sp: Spherical; $R^2$: coefficient of determination; SDD%: spatial dependence degree, and CV: Crossed validation.

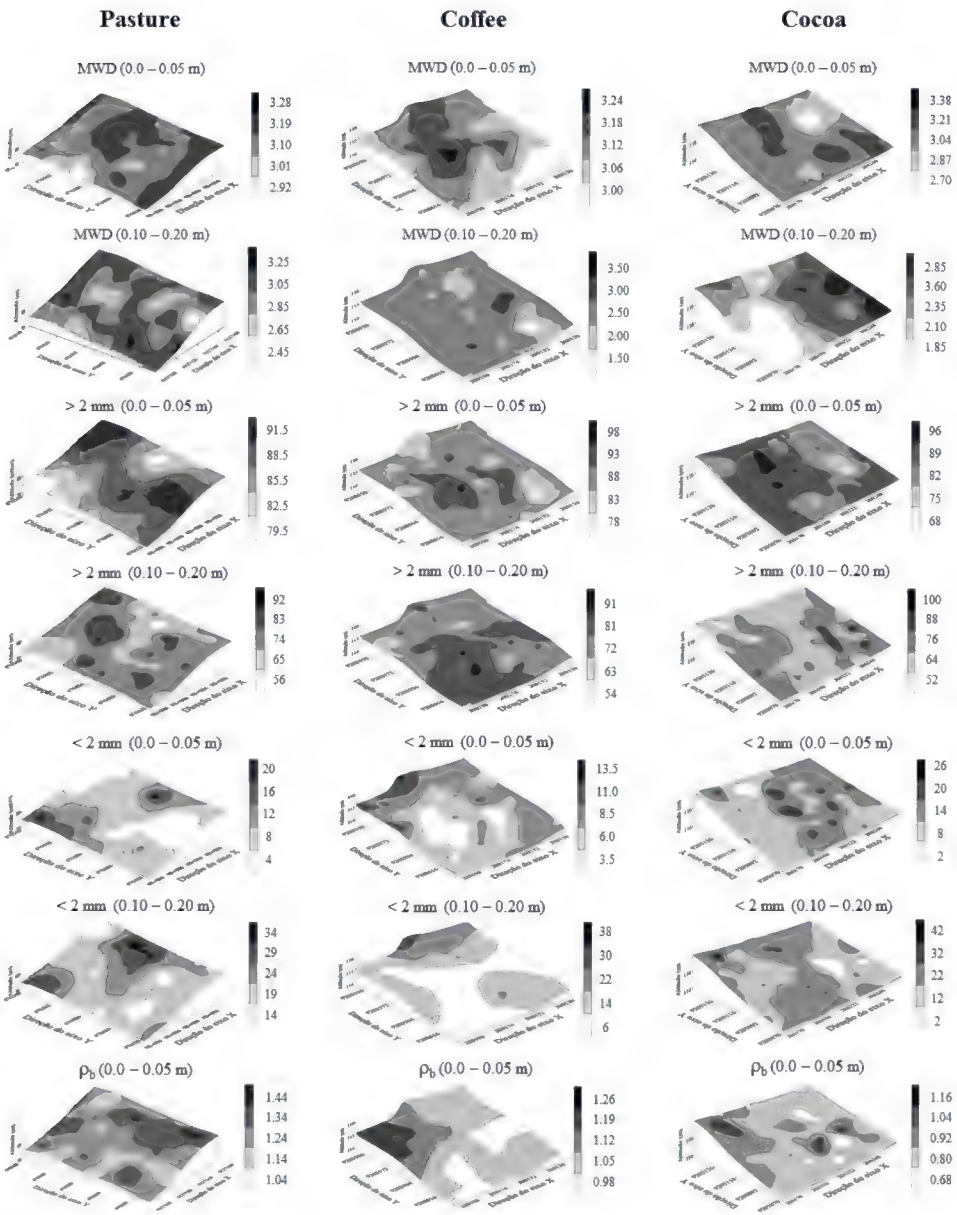
Table 3. Geostatistical parameter estimates to Mean Weight Diameter (MWD), organic carbon (OC), soil density ($\rho_b$), aggregate class greater than 2 mm (> 2 mm), aggregate class smaller than 2 mm (< 2 mm) in Indian Black Earth (IBE) areas under different managements.

The evaluated attributes presented range values superior to the sampling mesh (8 m), indicating that the variables are spatially related and they allow interpolations (VIEIRA, 2000).The highest range values were found for $\rho_b$ (48.90 m) at 0.0-0.05 m in soil grown with coffee, while aggregates > 2.00 mm presented the lowest reach value (11.50 m) at 0.10-0.20 m in soil grown with pasture. The range values for all variables were smaller as deeper, in this way the obtained results indicated greater spatial continuity of soil attributes in the superficial layers. This behavior corroborates with results observed by Souza et al. (2001).

The spatial dependence degree (SDD) was classified as strong for almost all soil uses, except in the area with cocoa, where the MWD presented moderate SDD. Moderate dependence was also found for the class of aggregates < 2.00 mm in coffee use, and $\rho_b$ in both coffee and cocoa areas regardless of depth. In turn, strong SDD was observed for OC in soil use with cocoa at 0.10-0.20 m, however, the aggregate class > 2.00 mm presented strong SDD at all evaluated depths and soil uses. The Strong spatial dependence observed is due to the native anthropic activities, ended up with IBEs formation (Aquino et al., 2015), while the mild spatial dependence reflected the nowadays soil use alterations, mostly at 0.0-0.05 m, the depth easilier affected by the soil management (CAMBARDELLA et al., 1994).

The isolines, surface and three-dimensional isoline maps obtained by interpolation of Kriging data presented similar values for the following variables: MWD, aggregates (> 2.00 <mm), $\rho_b$ and OC at different depths and soil uses (Figure 2). However, maps allowed to illustrate spatial variability as a function of land use, which cannot be clarified with classical statistics. In pasture soil use, it was observed that the MWD and the class of aggregates (< 2.00> mm) presented greater spatial continuity at 0.0-0.05 m, this behavior was evidenced by the greater distance between the isolines and indicated a more defined behavior for these variables. The reduction of MWD values in aggregates > 2.00 mm coincided with the increase in the class of aggregates < 2.00 mm at 0.10-0.20 m. This relation of decrease

and increase of aggregates of different classes reflected influence of the management in the properties of the soil.



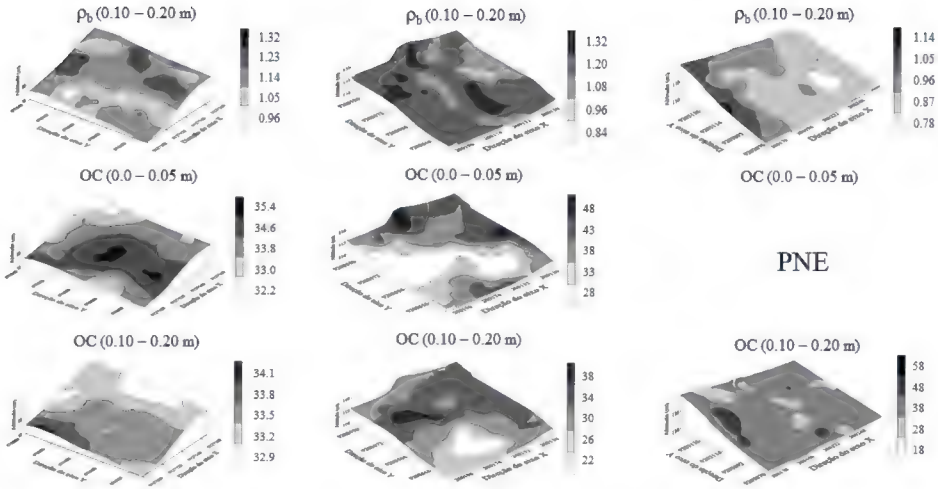



Figure 2. Isoline Maps of Mean Weight Diameter distribution (MWD, mm), aggregate class higher than 2 mm (> 2 mm), aggregate class smaller than 2 mm (< 2 mm), Bulk density ($\rho_b$, kg $dm^{-3}$), and organic carbon (OC, g $kg^{-1}$) at two depths.

The pasture soil use $\rho_b$ maps of were closer due to the greater access and permanence of the cattle in the pasture. These maps characterize the compaction of this environment caused by animal trampling, which caused the destruction of the larger aggregates and $\rho_b$ elevation to up to 0.05 m (AQUINO et al., 2014a; CAJAZEIRA and ASSIS JUNIOR 2011). However, $\rho_b$ and compaction observed in this study did not compromise root development in the different uses due to the high organic matter content observed in IBEs (CAMPOS et al., 2012).

The landscape and soil shape in pasture and cacao areas were similar, but soil attributes presented distinct aspects due to differences in cultural habit, use, and type of soil. At 0.0-0.05 m, it was not possible to capture the spatial variability (Figure 2), considering the sampling distance used (McBratney and Webster, 1986), due to the greater uniformity of the soil surface provided by cacao cultivation, which covers the soil with remains and where conditions a more homogeneous environment. These plant remains favored the maintenance of organic matter, reflecting in the highest values of OC (0.10-0.20 m) when compared to the other types of soil uses.

In a general way, soil under coffee cultivation, due to the diversity of geomorphological expressions (linear, concave and convex pedoforms), presented greater spatial discontinuity in the class of aggregates < 2.00 mm and in the WMD at 0.0-0.05 m. This discontinuity can be observed on the map, where there is the predominance of erratic isolines at close range (Figure 2), in the case, the spatial variability was a natural consequence of the landscape configuration, since maps at depth 0.10-0.20 m are spatially more uniform for these attributes. Other studies have also reported the influence of landscape shape on soil

physical properties (ALHO et al., 2015).

The results did not identify correlation between the soil physical attributes and the existing geomorphic expressions. However, other studies observed such correlation (SILVA et al., 2016). It was not observed due to the scale used in the studied areas. However, it was possible to observe a more homogeneous behavior for the physical attributes at 0.10-0.20 m regardless both soil use and type, confirming the deeper, the less affect the adopted management to the soil attributes in IBEs.

## 4 I CONCLUSIONS

The soil use influenced the soil physical attributes behavior in IBEs, where the higher values of CO, aggregates > 2.00 mm, and MWD at 0.00-0.05m in relation to $\rho_b$ and aggregates < 2.00 mm increased at 0.10-0.20 m.

Aggregates < 2.00 mm (0.10-0.20 m) and OC (0.0-0.5 m) did not show spatial dependence, while the aggregates class > 2,00 mm was the only soil attribute characterized as natural with a strong spatial dependence, regardless the soil use and depth.

There was no spatial relationship between the attributes studied and the geomorphic diversity.

## REFERENCES

ALHO LC, CAMPOS MCC, MANTOVANELLI BC, SILVA DMP, SOUZA ZM, CUNHA JM, SOARES MDR. Physical and geospatial attributes of inceptisols and ultisols under native vegetation in Humaitá, Am, Brazil. **Bioscience Journal.** v.32, n.2, p.422-430, 2016.

ALHO LC, CAMPOS MCC, SILVA DMP, MANTOVANELLI BC, SOUZA ZM. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e estoque de carbono em Cambissolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Tropical.** v.44, n.3, p.246-254, 2014.

AQUINO RE, CAMPOS MCC, MARQUES JÚNIOR J, OLIVEIRA IA, MANTOVANELLI BC, SOARES MDR. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em Latossolo sob floresta nativa e pastagem na Região de Manicoré, Amazonas. Revista Brasileira de Ciência do Solo. v.38, n.2, p.397-406, 2014a.

AQUINO RE, CAMPOS MCC, MARQUES JÚNIOR J, OLIVEIRA IA, TEIXEIRA DB, CUNHA JM. Uso de semivariogramas escalonados no planejamento amostral de atributos físicos do solo em ambientes na região Sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v.39, n.1, p.21-30. 2015.

AQUINO RE, CAMPOS MCC, OLIVEIRA IA, MARQUES JÚNIOR J, SILVA, DMP. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos antropogênico e não antropogênico na região de Manicoré, AM. **Bioscience Journal.** v.30, n. 4, p.988-97, 2014b.

Brasil. Ministério das Minas e Energia. Projeto Radambrasil. 17ª ed. Rio de Janeiro: **Folha SB. 20, Purus**; 1978.

Burrough PA, McDonnell RA. **Principles of geographical systems**. New York: Oxford University Press; 2000.

CAJAZEIRA JP, ASSIS JÚNIOR RN. Variabilidade espacial das frações primárias e agregados de um Argissolo no Estado do Ceará. **Revista Ciência Agronomica.** v.42, n.2, p.258-267, 2011.

CAMARGO LA, MARQUES JJ, PEREIRA GT. Spatial variability of physical attributes of an Alfisol under different hillslope curvatures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v.34, n.4, p.617-630, 2010.

CAMBARDELLA CA, MOORMAN TB, NOVAK JM, PARKIN TB, KARLEM DL, TURCO RF, KONOPA AE. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. **Soil Science Society American Journal.** v.58, n.4, p.1501–1511,1994.

CAMPOS MCC, AQUINO RE, OLIVEIRA IA, BERGAMIN AC. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração e umidade do solo em área cultivada com cana-de-açúcar na região de Humaitá, Amazonas, Brasil. **Agrária.** v.8, n.2, p.305-310, 2013b.

Campos MCC, Ribeiro MR, Souza Júnior VS, Ribeiro Filho MR, Souza RVCC, Almeida MC. Caracterização e Classificação de Terras Pretas Arqueológicas na região do Médio Rio Madeira. **Bragantia.** v.70, n.4, p.598-609, 2011.

CAMPOS MCC, SANTOS LAC, SILVA DMP, MANTOVANELLI BC, SOARES MDR. Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. **Revista Agro@mbiente.** v.6, n.1, p.102-109, 2012.

Campos MCC, Soares MDR, Santos LAC, Oliveira IA, Aquino RE, Bergamin AC. Variabilidade espacial dos atributos físicos em um Argissolo Vermelho sob floresta. **Comunicata Scientia.** v.4, p.168-178, 2013a.

CRUZ JS, ASSIS JÚNIOR RN, MATIAS SSR, CAMACHO-TAMAYO JH, TAVARES RC. Análise espacial de atributos físicos e carbono orgânico em Argissolo vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar. Ciência e Agrotecnologia. v.34, n.2, p.271-278. 2010.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo.** 2ª ed. Rio de Janeiro: 1997, 167p.

EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária –. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solo**. 3ª ed. Brasília. 2013, 263 p.

GARCIA, RA, ROSOLEM, CA. Agregados em um Latossolo sob sistema plantio direto e rotação de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.** v.45, n.6, p.1489-1498. 2010.

KEMPER WD, CHEPIL WS. **Aggregate stability and size distribution.** In: Black CA, editor. Methods of soil analysis. Madison: American Society of Agronomy; 1965. p. 499–510.

MARQUES JDO, LUIZÃO JL, TEIXEIRA GT, SARRAZIN M, FERREIRA SJF, BELDINI TP, ARAÚJO MARQUES EM. Distribution of organic carbon in different soil fractions in ecosystems of Central Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.39, n.1, p.232-42. 2015.

MCBRATNEY AB E WEBSTER R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. Journal Soil Science. v.37, n.3, p.617-639. 1986.

MINITAB RELEASE 14.1. **Statistical Software**. US/Canadá; 2000.

OLIVEIRA IA, CAMPOS MCC, SOARES MDR, AQUINO RE, JÚNIOR JM, NASCIMENTO EP. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, sob diferentes usos na região Sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v.37, n.4, p.1103-1112. 2013.

OLIVEIRA IA, MARQUES JÚNIOR J, CAMPOS MCC, AQUINO RE, FREITAS L, SIQUEIRA DS, CUNHA JM. Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de Argissolos da região de Manicoré, AM. Revista Brasileira de Ciência do Solo. v.39, n.4, p.668-681. 2015.

SILVA DMP, CAMPOS MCC, FRANCISCON U, ALHO LC, SANTOS LAC, PAULA NETO P, BERGAMIN AC, SOUZA ZM. Spatial Variability of Soil Properties in Archeological Dark Earth Sites under Cacao Cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v. 40, p. 816-828, 2016.

SOIL SURVEY STAFF**. Keys to soil taxonomy**. 12th ed. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service; 2014.

SOUZA, ZM, SILVA, MLS, GUIMARÃES, GL, CAMPOS, DTS, CARVALHO, MP, PEREIRA, GT. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.699-707. 2001.

STEINBEISS S, GLEIXNER G, ANTONIETTI M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. Soil Biol Biochem. 2009;41:1301-10.

SURFER FOR WINDOWS. Realese 7.0. **Contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers.** User's guide. NY/Estados Unidos: Golden Software; 1999.

VIEIRA SR. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS RF. ALVAREZ VH, SCHAEFER GR, editors. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2000. p.1-54.

VIEIRA SR. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos relacionados com o estado de agregação de dois Latossolos cultivados no sistema de semeadura direta. **Bragantia.** v.70, n.2, p.185-195. 2011.

WARRICK AW, NIELSEN DR. **Spatial variability of soil physical properties in the field**. In: Hillel D, editor. Applications of soil physics. New York: Academic Press; 1980.

YEOMANS JC, BREMNER JM. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication Soil Science Plant and Analisys.** v.19, n.2., p.1467–1476. 1988.

# CAPÍTULO 13

# FRACTAL FEATURES OF SOIL TEXTURE AND PHYSICAL ATTRIBUTES IN ARCHAEOLOGICAL DARK EARTH UNDER DIFFERENT USES IN WESTERN AMAZON

*Data de aceite: 18/05/2021*
*Data de submissão: 11/05/2021*

**Half Weinberg Corrêa Jordão**
Universidade Estadual Paulista
Botucatu – São Paulo
http://lattes.cnpq.br/7144402196977043

**Milton César Costa Campos**
Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal da Paraíba
Areia - Paraíba
https://orcid.org/0000-0002-8183-7069

**José Maurício da Cunha**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
https://orcid.org/0000-0003-4057-1708

**Ivanildo Amorim de Oliveira**
Instituto Federal de Rondônia
Ariquemes – Rondônia
https://orcid.org/0000-0003-2299-3229

**Laércio Santos Silva**
Universidade Estadual Paulista
Jaboticabal – São Paulo
https://orcid.org/0000-0002-0805-1318

**Ludmila de Freitas**
Universidade Estadual Paulista
Jaboticabal – São Paulo
https://orcid.org/0000-0005-0904-2415

**Romário Pimenta Gomes**
Universidade Estadual Paulista
Jaboticabal – São Paulo
https://orcid.org/0000-0003-0663-0962

**Elilson Gomes de Brito Filho**
Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal da Paraíba
Areia - Paraíba
https://orcid.org/0000-0001-6718-2126

**Bruno Campos Mantovanelli**
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria – Rio Grande do Sul
https://orcid.org/0000-0003-4291-1729

**ABSTRACT:** Studying particle size distribution is important to understand soil structure and formation processes. This research aimed to assess the fractal dimension of soil texture in Archeological Dark Earth (ADE) areas in southern Amazonas state under different land uses, as follows: two areas in the municipality of Apuí, one growing cocoa and the other coffee; a grassland area in the municipality of Manicoré; and a forest area in the municipality of Novo Aripuanã. A sampling grid containing 88 collection points (intersecting points on the grid) was established in each area, measuring 80 x 42 m for the cocoa and coffee-growing sites, and 80 x 56 m and 60 x 42 m for the grassland and forest areas, respectively. Soil samples were collected in soil core and as clumps at a depth of 0.0-0.20m to determine the structural physical properties and texture of the soil. The following physical attributes were assessed: texture (PSD), bulk density (BD), macroporosity (Macro), microporosity (Micro), total porosity (TP) and aggregate stability (GMD and WMD). The fractal dimension (D) of the soil texture was determined, followed by analysis of

variance and comparison of the means using Tukey's test ($p \leq 0.05$). Pearson's correlation was applied to assess the correlation between variables. There was a significant difference between the ADEs studied, with a higher D value in the cocoa-growing area in relation to the other sites. Additionally, the larger the clay fraction, the higher the D value. Fractal dimension (D) showed a positive correlation with sand, clay, BD, Macro, GMD and WMD, and a negative correlation with silt, micro, TP. Based on the D values obtained, the ADE cultivated with cocoa showed superior quality in relation to the other areas studied.
**KEYWORDS:** Fractal dimension; soil physics; soil use.

## CARACTERÍSTICAS FRACTAIS DA TEXTURA E ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM AREAS COM TERRA PRETA DE ÍNDIO SOB DIFERENTES USOS NA AMAZÔNIA OCIDENTAL

**RESUMO:** Estudar a distribuição do tamanho das partículas é importante para entender a estrutura do solo e os processos de formação. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a dimensão fractal da textura do solo em áreas de Terra Preta Arqueológica (TPA) no sul do Estado do Amazonas sob diferentes usos da terra: duas áreas no município de Apuí, uma com cultivo de cacau e outra de café; uma área de pastagem no município de Manicoré; e uma área florestal no município de Novo Aripuanã. Uma malha de amostragem contendo 88 pontos de coleta (pontos de interseção na grade) foi estabelecida em cada área, medindo 80 x 42 m para as áreas de cacau e café, e 80 x 56 m e 60 x 42 m para as áreas de pastagem e floresta, respectivamente. Amostras de solo foram coletadas em torrões a uma profundidade de 0,0-0,20 m para determinar as propriedades físicas estruturais e a textura do solo. Os seguintes atributos físicos foram avaliados: textura, densidade do solo (DS), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), porosidade total (PT) e estabilidade de agregados (DMG e DMP). Determinou-se a dimensão fractal da textura do solo (D), seguida da análise de variância e comparação das médias pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). A correlação de Pearson foi aplicada para avaliar a correlação entre as variáveis. Houve uma diferença significativa entre as TPAs estudadas, com um maior valor D na área de cultivo de cacau em relação aos outros locais. Além disso, quanto maior a fração argila, maior o valor de D. A dimensão fractal (D) apresentou correlação positiva com areia, argila, DS, Macro, DMG e DMP, e correlação negativa com silte, micro, PT. Com base nos valores de D obtidos, as TPAs cultivadas com cacau apresentaram qualidade superior em relação às demais áreas estudadas.
**PALAVRAS-CHAVE:** Dimensão Fractal, Física do solo, Uso do solo.

## 1 I INTRODUCTION

Applications of fractal geometry in soil science have shown that soil exhibits fractal characteristics, being a porous medium having different particle compositions, with irregular shape and self-similar structure (TYLER and WHEATCRAFT, 1989; KRAVCHENKO and ZHANG, 1998). Fractal geometry, proposed and established by Mandelbrot (1982), is a method for describing systems with non-characteristic scales and self-similarity. In recent years, this theory has been used to quantitatively describe the particle size distribution of soil, attracting the interest of pedologists worldwide (DENG et al., 2017). Particle size

distribution is one of the most important physical characteristics of soil because of its significant influence on water flow and soil erosion (XU et al., 2013).

In this respect, broad and precise knowledge of particle size distribution is vital to understanding soil structures and formation, since it is closely related to soil erosion, organic matter content and moisture content (DU et al., 2017). Deng et al. (2017) studied the fractal features of soil particle size distribution and found an association between fractal dimensions and the physical and chemical properties of the soil analyzed, indicating that the lower the fractal dimension, the worse the soil physical and chemical properties. Recently, the fractal method was applied to estimate soil structure and proved to be an efficient tool in analyzing soil properties and their relationship with other environmental factors (XIA et al., 2015; DENG et al., 2017).

Textural analysis is commonly used to characterize particle size distribution (PSD) in soil, but the size definitions of the three main fractions (sand, silt and clay) are quite random and therefore cannot provide comprehensive information (DENG et al., 2017). In this case, according to the results of a study conducted by Xia et al. (2015), fractal dimension can be used to identify soil particle size characteristics. Additionally, Filgueira et al. (2006) reported that fractal theory and analysis can effectively describe soil texture.

According to Cunha et al. (2016), exhaustive soil use and management can irreparably damage its physical quality, thereby reducing its yield potential. In this context, a quantitative description of particle size distribution is important in soil structure research, and fractal dimension is a useful approach in quantitatively evaluating different land-use patterns (DENG et al., 2017).

In this research, verified the PSD and fractural dimensions of soils under different crops and natural environment, and identified the relationships between soil physical properties. The objective of this research was to evaluate the possibility that the fractal dimension of PSD can be used as an integrative index to quantify crop effects associated with structural quality in Archaeological Dark Earth in the Western Amazon.

## 2 I MATERIAL AND METHODS

### Experiment location

The soils were located in the region of the municipality of Apuí-AM, Brazil and Novo Aripuanã-AM, Brazil (Figure 1). The climate in the region was classified as humid tropical according to Köppen's classification, with a short dry period (between May and September), a mean annual temperature of 25 to 26 °C, rainfall from 2,200 to 2,700 mm and a relative air humidity of 85% to 90% (Brasil, 1978; Campos *et al.*, 2012). The characteristic vegetation of the region is tropical dense forest, consisting of dense multilayered trees between 15 and 20 meters high (ZEE, 2008).

The study was conducted at the four Archaeological Dark Earth (ADE) under different

land uses. Two were located in the municipality of Apuí (7° 12' 05" S and 59° 39' 35" W), one under cultivation for 14 years, growing rice, maize, beans and watermelon for six years and cocoa (*Theobroma cacao*) thereafter, and the other used a grassland for two years, followed by coffee (*Coffea canephora*) cultivation for four years. No machinery was used in either area to plant or maintain the crops. The soil in both ADEs areas was classified as Typic Hapludults, according to Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014) and "*Argissolo Amarelo Eutrófico"* to criteria established by the Brazilian Soil Classification System (Embrapa, 2013).

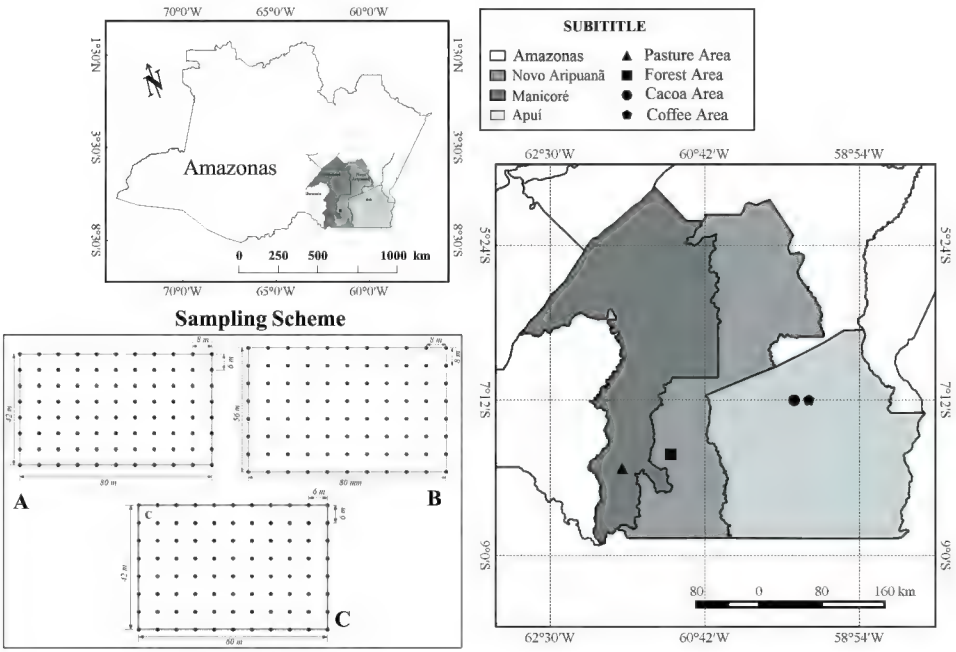



Figure 1. Location and representation of the sampling grid in the TPAs studied, with the respective spacing between collection points. A – Cocoa and Coffee; B – Grassland; C – Forest.

The third area is located in the municipality of Manicoré (Figure 1) (7° 59' 22" S and 61° 39' 51.2" W, mean altitude of 83 m), used for extensive grazing (*Brachiaria brizantha*) for approximately 7 years and capable of supporting livestock at around one unit/animal per hectare. The soil was classified as Typic Rhodudults (Soil Survey Staff, 2014) or *"Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico"* (Embrapa, 2013) and primary vegetation in the region is characterized as dense tropical forest. The final area (forest) was a forest fragment in the municipality of Novo Aripuanã (Figure 1) (07° 51' 30" S and 61° 18' 01" W), preserved for more than 25 years and containing 15 to 20-meter-high secondary trees, the soil types in this area classified as Xanthic Eutrudox (Soil Survey Staff, 2014) or *"Latossolo Vermelho Amarelo latossólico"* (Embrapa, 2013).

## Soil-sampling and evaluation of soil attributes

A sampling grid was established in each area, with 88 collection points per grid. Grid dimensions were 80 x 42 m in the cocoa and coffee areas, 80 x 56 m in the grassland area and 60 x 42 m in the forest area, with 6 x 8 m spacing between points for the coffee and cocoa areas and 8 x 8 m and 6 x 6 m for the grassland and forest areas respectively (Figure 1).

In order to determine the structural and textural properties of the soil, deformed (clumps) and non-deformed samples were collected between 0.0-0.20 m depth, using a 4.0 cm high soil-core with an internal diameter of 5.1 cm.

The following physical properties were determined to correlate fractal dimension with particle size: texture (sand, silt and clay), bulk density (BD), macroporosity (Macro), microporosity (Micro), total porosity (TP) and aggregate stability (GMD and WMD).

The particle size distribution (PSD) was determined with 1.0 mol $L^{-1}$ NaOH solution was used as chemical dispersant, with a resting time of 16 hours. Next, the suspension was transferred to steel cups containing water and coupled to an electric stirrer at 12,000 RPM for 15 minutes (Donagema *et al.*, 2017). The clay fraction (<0.002 mm) was separated using the pipette method, sand by sieving and silt (0.05-0.002 mm) was calculated based on the difference. The sand fraction was divided into coarse (0.5-2.0 mm), medium (0.25-0.5 mm) and fine (0.105-0.24 mm) according to Arraes et al. (2010), in order to calculate the fractal dimension.

Next, the fractions obtained were sieved to determine the size of the solid particles analyzed, using a SOLOTEST sieve shaker with digital time and frequency adjustment to separate the particles through vibrations that accelerate sieving. Each sample was agitated for 3 minutes, using sieves with mesh sizes of 2mm; 1mm; 0.5mm; 0.250mm; 0.125mm and 0.053mm.

The samples were prepared in the laboratory by removing the excess of soil from the soil core edges; they were then saturated by a gradual increase in water depth until reaching approximately 2/3 of the soil core height. Total porosity was determined by the saturation method. Macroporosity was obtained from the balance of the set soil core-soil after applying --6 kPa in a tension table. In its turn, microporosity was obtained by subtracting the weight of the soil core-soil set equilibrated at -6 kPa and its respective oven-dried weight at 105 °C.

Bulk density was determined by the soil core method as described in Grossman & Reinsch (2002). In this case, the soil in the soil core was oven dried at 105 °C until constant weight.

Aggregate stability was assessed according to Kemper and Chepil (1965), with modifications in the following size classes:4.76-2.0 mm; 2.0-1.0 mm; 1.0-0.50 mm; 0.50-0.25 mm; 0.25-0.125 mm; 0.125-0.063 mm. The aggregates were placed in contact with water in a 2.0 mm mesh sieve and submitted to vertical agitation in a Yoder sieve shaker

(SOLOTEST) for 15 min, at 32 oscillations per minute.

The material from each class retained in the sieve was dried in an oven at 105°C and the respective masses were measured on a digital balance. The weighted mean diameter (WMD) was calculated based on the formula proposed by Castro Filho *et al.* (1998) and the geometric mean diameter (GMD) in line with Schaller and Stockinger (1953) as cited by Alvarenga *et al.* (1986), using the following equations:

$$WMD = \frac{\sum_{i=1}^{N} n_i D_i}{\Sigma} \text{ and } GMD = 10^{\frac{\sum_{i=1}^{n} n_i log D_i}{\Sigma}}$$

where:

ni = is the percentage of aggregates retained in the sieve, Di = the mean diameter of the sieve and N = the number of sieve classes.

## Soil fractal model theory

The definition of a fractal can be given based on the relationship between number and size in a statistically self-similar system and defined by the following Equation 1 (Mandelbort, 1982, Turcotte, 1986):

$$N(X > x_i) = kx_i^{-D} \qquad (1)$$

In an effort to compensate for the lack of N values, Tyler and Wheatcraft (1992) estimated the fractal dimension of soil particle-size distribution, Dm, based on the following Equation 2. Fractal dimension (D) was estimated using the particle size distribution (PSD) method proposed by Taylor and Wheatcraft (1992), based on the size distribution values for particles of coarse, medium and fine sand, silt and clay, according to the following equation:

$$\frac{M(r<R)}{M_T} = \left(\frac{R}{R_L}\right)^{3-D} \qquad (2)$$

were:

*M* = is the accumulated mass of the *r*-sized soil fractions (coarse, medium and fine sand, silt and clay) smaller than; *R* = determined by the diameter of the sieves; $M_T$ = the total mass; $R_L$ = the parameter that estimates the largest particle size; *D* = the fractal dimension of the particles.

The equation is limited by the variation of D, with 0<D<3, and is applied to describe the particle size distribution of dry soil.

## Statistical analysis

The fractal dimension results obtained for each area were submitted to analysis of variance and, when significance was observed according to the F-test, the means were compared using Tukey's test at 5% probability. The correlation between fractal dimension and the physical attributes of the respective ADEs was analyzed using Pearson's correlation coefficient. All analyses were performed using Assistat software, version 7.7 (Silva and

Azevedo, 2016). D values were calculated using an electronic spreadsheet and R statistical software, version 3.4.1 (R Core Team, 2013).

## 3 | RESULTS AND DISCUSSION

### Soil particle-size distribution, fractal features and physical attributes

As shown in Table 1, there are considerable differences in PSD among the four areas the ADEs in this study. The predominant soil particle size is sand, followed by silt. The average of the sand fraction range from 375.0 g/kg$^{-1}$ at 707.0 g/kg$^{-1}$, the clay content is relatively lower, range from 17.0 g/kg$^{-1}$ to 248.0 g/kg$^{-1}$ and the silt content between 199.0 g/kg$^{-1}$ at 607.0 g/kg$^{-1}$ (Table 1). Dominance of coarse particles in these areas of ADEs (forest and grassland) can be explained by the contribution of lithic and ceramic fragments, thus presenting higher levels for the sand fraction. Dominance of the sand and silt fraction was also reported by Campos et al. (2012); Mota Júnior et al. (2017) in anthropic soils in the city of Apuí-AM, associating this granulometric characteristic with the formation of these soils and constituent materials. In addition, it is important to note that the use of fire retardants in the presence of sand is more likely to occur in the sand (2000).

Considering ADEs under grassland and forest areas, the relationship of PSD has an influence on processes related to movement and retention of water, solute transport, heat and air in the soil. In the grassland area, due to the forces acting on the soil, the processes of degradation, decreased water retention capacity, soil nutrient loss and soil structure decrease are indicative of the selective removal of fine fractions and can be attributed to the anthropic processes and the source material acting in the formation of these soils. Xu et al. (2013) and Deng et al. (2017), observed similar behavior in non-anthropogenic soils as the granulometric fractions of sand. Cocoa and coffee areas presented domain of the silt fraction, in this case, the silt fraction together with clay, acted in the processes related to greater structuring and aggregation in these areas.

| Cocoa area | | | | | | | Coffee area | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Variable | Mean | StDev | CoefVar | Minimum | Maximum | $R^2$ | Variable | Mean | StDev | CoefVar | Minimum | Maximum | $R^2$ |
| D | 2.80 | 0.02 | 0.79 | 2.76 | 2.85 | 0.851 | D | 2.43 | 0.02 | 0.79 | 2.39 | 2.54 | 0.822 |
| Silt (g/kg-¹) | 549.89 | 21.00 | 3.82 | 491.13 | 590.56 | | Silt (g/kg-¹) | 607.96 | 26.64 | 4.38 | 531.20 | 666.06 | |
| Clay (g/kg-¹) | 248.03 | 39.27 | 15.83 | 174.09 | 341.12 | | Clay (g/kg-¹) | 17.29 | 2.94 | 16.99 | 13.09 | 38.74 | |
| Sand (g/kg-¹) | 201.41 | 33.38 | 16.57 | 121.10 | 274.11 | | Sand (g/kg-¹) | 375.55 | 26.74 | 7.12 | 317.57 | 454.13 | |
| BD (Mg m³) | 0.93 | 0.09 | 9.22 | 0.59 | 1.15 | | BD (Mg m³) | 1.14 | 0.14 | 12.63 | 0.72 | 1.43 | |
| Macro (cm³ cm⁻³) | 0.20 | 4.01 | 19.49 | 11.74 | 31.03 | | Macro (cm³ cm⁻³) | 0.19 | 3.94 | 20.49 | 9.54 | 27.52 | |
| Micro (cm³ cm⁻³) | 0.46 | 3.26 | 7.03 | 35.64 | 53.49 | | Micro (cm³ cm⁻³) | 0.38 | 1.99 | 5.21 | 34.25 | 45.09 | |
| TP (cm³ cm⁻³) | 0.66 | 3.14 | 4.69 | 58.85 | 73.25 | | TP (cm³ cm⁻³) | 0.57 | 3.54 | 6.16 | 50.27 | 66.57 | |
| GMD (mm) | 2.60 | 0.28 | 10.74 | 1.80 | 3.34 | | GMD (mm) | 2.55 | 0.28 | 10.86 | 1.73 | 3.19 | |
| WMD (mm) | 2.87 | 0.21 | 7.24 | 2.19 | 3.35 | | WMD (mm) | 3.01 | 0.14 | 4.75 | 2.38 | 3.29 | |
| Grassland area | | | | | | | Forest area | | | | | | |
| D | 2.61 | 0.03 | 1.32 | 2.53 | 2.69 | 0.985 | D | 2.68 | 0.02 | 0.64 | 2.64 | 2.73 | 0.954 |
| Silt (g/kg-¹) | 226.43 | 28.79 | 12.71 | 160.14 | 326.39 | | Silt (g/kg-¹) | 199.41 | 29.81 | 14.95 | 139.30 | 278.56 | |
| Clay (g/kg-¹) | 65.80 | 16.12 | 24.50 | 34.84 | 112.85 | | Clay (g/kg-¹) | 94.51 | 10.79 | 11.42 | 70.98 | 123.17 | |
| Sand (g/kg-¹) | 707.76 | 28.63 | 4.05 | 606.14 | 759.59 | | Sand (g/kg-¹) | 705.69 | 30.88 | 4.38 | 627.90 | 767.96 | |
| BD (Mg m³) | 1.27 | 0.09 | 7.26 | 1.04 | 1.47 | | BD (Mg m³) | 1.05 | 0.06 | 5.82 | 0.93 | 1.23 | |
| Macro (cm³ cm⁻³) | 0.17 | 2.22 | 12.71 | 13.08 | 24.62 | | Macro (cm³ cm⁻³) | 0.18 | 2.00 | 10.74 | 13.02 | 23.46 | |
| Micro (cm³ cm⁻³) | 0.38 | 2.31 | 6.06 | 27.30 | 45.09 | | Micro (cm³ cm⁻³) | 0.22 | 1.69 | 7.41 | 19.50 | 26.40 | |
| TP (cm³ cm⁻³) | 0.55 | 2.56 | 6.13 | 36.14 | 47.51 | | TP (cm³ cm⁻³) | 0.40 | 2.60 | 6.28 | 32.90 | 46.54 | |
| GMD (mm) | 2.67 | 0.22 | 8.31 | 2.06 | 3.03 | | GMD (mm) | 2.03 | 0.31 | 15.09 | 1.42 | 2.73 | |
| WMD (mm) | 3.10 | 0.10 | 3.19 | 2.82 | 3.25 | | WMD (mm) | 2.56 | 0.27 | 10.52 | 1.96 | 3.08 | |

D = Fractal dimension; BD = Bulk density; Macro = Macroporosity; Micro = Microporosity; GMD = Geometric mean diameter; WMD = Weighted mean diameter; StDev = standard deviation; CoefVar = coefficient of variation.

Table 1. Descriptive statistics of the fractal dimension and physical attributes in Archaeological Dark Earth under different uses in the Western Amazon.

The fractal dimension (D) values presented in Table 1 show differences between the ADEs under management and forest, in which they are characterized by a decrease in the fractal dimension, indicating that soils in the cultivated lands with cocoa are better, and coffee and grassland as highly influenced by management. This is because the sites with more expressive antropic spot were used for cultivation of species that provide greater input of vegetal residues. It is possible to verify that the greater the value of the clay fraction and the lower the BD, the greater the D, this corroborates with researches done by Liu et al. (2009) and Deng et al. (2017), in which they verified that the fractal dimension of the soil particle was larger when the texture was finer, corresponding to the particle size distribution of the soil. Overall, D values in the forest and cocoa area varied respectively from 2.68 to

2.80. The variation of D values in all areas was relatively high, so the use of D based on PSDs could provide more information than just soil texture.

The coefficients of determination ($R^2$) showed, in general, values were satisfactory, that is, they can satisfactorily explain the results obtained for D, since they ranged from 0.822 to 0.985, indicating that on average 90% of the results obtained are explained by model. Huang et al. (2017) also found high $R^2$ values, ranging from 0.961 to 0.992, indicating that it is reasonable to use the fractal model to evaluate the particle size distribution of soils.

From the physical attributes of soil physical quality (macroporosity, microporosity, TP and BD), the degree of similarity between the different areas is evident, decreasing only to the forest area and grassland in attributes such as TP and BD. In the condition of physical quality of soils, management areas and natural area, values higher than those established by the literature, mainly macroporosity, always higher than 15%, as already highlighted in Tormena et al. (2002). In the forest area, physical variables of macro, micro and total porosity presented, respectively, 0.18, 0.22 and 0.4 $cm^3$ $cm^{-3}$ (Table 1), this behavior observed in forest area, leaves strong evidence of the low magnitude of the anthropic processes of formation of the ADEs at this site, thus considering low variation with areas where the anthropic formation process was more accentuated. Cocoa area presented significant results, in which the TP reached 0.66 $cm^3$ $cm^{-3}$, influencing a low BD of 0.93 Mg $m^3$ (Table 1). Contrary to what was observed in the forest area, anthropic action was more expressive in this environment, even more associated with the great contribution of vegetal cover, which incorporates residues and lead to a greater formation of biopores by agents of the micro and meso fauna, favoring the diffusion of oxygen in the soil to the roots.

Effects of the influence of management on physical properties are more significant in the grassland area, mainly on the BD, with values of 1.27 Mg $m^3$, making it evident that, anthropic soils are highly subject to degradation due to their management, and that the effects of the excess of animal grazzing can lead to the strong compaction of these soils, as it was evident the comparison with areas where the management is not very intense (cocoa and coffee) and mainly in natural area (forest).

Compared to the GMD values of the different systems of use in the ADEs (Table 1), there is reduced GMD in forest area with a value of 2.03 mm, this behavior of aggregate diameter, disagrees with the characteristics of occurrence in soils of native conditions, making evident the influence of the sandy texture in the aggregate stabilization capacity. On the other hand, ADE under grassland presented higher GMD and WMD results, respectively 2.67 mm and 3.10 mm. However, this behavior as highlighted by Mantovanelli et al. (2015) does not show in this specific case, better structural conditions, since these values of aggregates are due to the fact that the soil is at the level of compaction exerted by the animal grazzing and thus present greater resistance to rupture.

## Pearson correlation

From Table 2 we present the Pearson correlation with emphasis on the correlation between D and other soil physical attributes. It is observed that the correlation coefficient was significant at 1% between D and the clay fraction, and significant at 5 % probability between D and BD. D showed positive correlation with sand, clay, BD, macro, GMD and WMD and negative correlation with silt, microporosity and TP.

| | D | Sand | Silt | Clay | BD | Macro | Micro | TP | GMD | WMD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| D | 1 | 0,09 | -0,08 | 0,29** | 0,21* | 0,06 | -0,13 | -0,11 | 0,20 | 0,13 |
| Sand | | 1 | -0,04 | 0,27* | 0,23* | -0,01 | -0,17 | -0,25* | -0,06 | -0,07 |
| Silt | | | 1 | 0,02 | -0,03 | -0,08 | 0,13 | 0,05 | 0,17 | 0,21* |
| Clay | | | | 1 | 0,21* | -0,11 | -0,08 | -0,10 | -0,02 | -0,06 |
| BD | | | | | 1 | -0,52** | 0,08 | -0,65** | -0,08 | -0,14 |
| Macro | | | | | | 1 | -0,46** | 0,71** | 0,12 | 0,18 |
| Micro | | | | | | | 1 | 0,14 | 0,01 | 0,002 |
| TP | | | | | | | | 1 | 0,14 | 0,23* |
| GMD | | | | | | | | | 1 | 0,72** |
| WMD | | | | | | | | | | 1 |

** Significant at 1% probability level; * Significant at the 5% probability level; D = fractal dimension; BD = Bulk density; Macro = Macroporosity; Micro = Microporosity; TP = total porosity; GMD = Geometric mean diameter; WMD = Weighted mean diameter.

Table 2. Pearson correlation of fractal dimension and physical attributes in Archaeological Dark Earth under different uses in the Western Amazon.

From the soil texture, high correlation of the clay fraction with D was observed, corroborating works by Xu et al. (2013); Xia et al. (2015) and Deng et al. (2017), who found a positive and strong correlation of the clay fraction with D. However, in their respective studies, Xu et al. (2013) and Huang et al. (2017) found a strong positive correlation between D with silt fraction and negative correlation with sand fraction, differently from what was observed in this work, where silt presented negative correlation (-0.08) and sand positive correlation (0.09), thus not corroborating with the authors mentioned above. Huang et al. (2017) evaluated changes in texture, structure stability and nutrient availability of artificial soils on the slopes due to restoration time in Southeast China and found significant correlation coefficient between D and BD, but this correlation was negative in order of -0.805. These results, different from the present study, however should be considered that the authors worked in areas that underwent intensive soil structure management, which certainly influence BD values.

In a study by Liao et al. (2017), verified that the soil moisture showed a weak spatial dependence according to the fractal dimension criteria. Thus, it is stated that, in general,

the fractal dimension is better than the ratio of nugget/range effect in describing the spatial dependence of soil properties.

In this context, the D of the soil particle size distribution, is an important tool to describe mainly attributes that characterize soil types, in addition, Deng et al. (2017) make an association of values of D with the quality of the physical-chemical properties of the soil, so the lower the value of D the lower the quality of the soil.

## Relationship between fractal dimension and soil particle-size distribution

Linear regression analyzes were performed to determine the relationships between D and the sand, silt and clay contents (Figures 2 and 3) in the different areas of ADEs. The statistical results obtained from the 88 sample points show that the fractal dimension of the PSD has a strong positive correlation with the clay content in all ADEs (Figure 2B, $n = 88$, $R^2 = 0.99$, $P < 0.05$, Figure 2E, $n = 88$, $R^2 = 0.94$, $P < 0.05$, Figure 3A, $n = 88$, $R^2 = 0.88$, $P < 0.05$, Figure 3E, $n = 88$, $R^2 = 0.97$, $P < 0.05$). Results indicate a weak relationship between D and sand content in the different systems of ADEs use, except in the cocoa are ($R^2 = 0.71$, Figure 2C), the negative correlation is evident in the other areas, with $R^2$ ranging from 0.08 to 0.13. Thus, regression analysis indicates that ADEs with higher clay contents and smaller sand fractions have higher D values. Other studies have shown similar results in very different landscapes and under contrasting climatic conditions (Liu et al., 2009).

From the linear regressions in the areas cultivated with cocoa (Figure 2 A-B-C) and forest area (Figure 3 A-B-C), it was verified that there was a significant decrease in the coefficient of determination between the different textural fractions, thus having a difference between the D of a natural and cultivated environment. A similar result was found by Xu et al. (2013), where they verified that the differences between cultivated areas and forest environments are characterized by a decrease in the fractal dimension, indicating that soils in agricultural lands are better. However, it is worth mentioning that the relationships between the cultivated areas with cocoa (Figure 2 A-B-C) and coffee (Figure 2 D-E-F) were too deferential, with the cultivated area with coffee, lower values in relation, thus evidencing that not only the environment, but also the type of crop cultivated can influence the D. Despite the fact that these two cultivated areas are close to each other and present the same soil class over the years, their management was different, since the cocoa area was previously cultivated by other crops (rice, corn, beans and watermelon), while the coffee area, besides having a few years of cultivation, in the first two years was used by grassland.

The characteristics of D verified from the linear regressions and the relationships with the PSD (Figures 2 and 3), thus indicate, accelerated the physical soil structuring process in the evolution of the ADE formation process under cocoa cultivation. The effects associated to higher ratio of clay fraction in this crop, associated with the high organic matter input, lead to a maintenance of organic carbon and nutrients, mainly attributed to fine particles that enrich with stable organic C and N, as well as increase of formation of particulate organic

matter. As the proportion of coarse fractions increases, the negative correlation obtained is evident, thus evidencing the tendency of decrease in the levels of organic carbon.

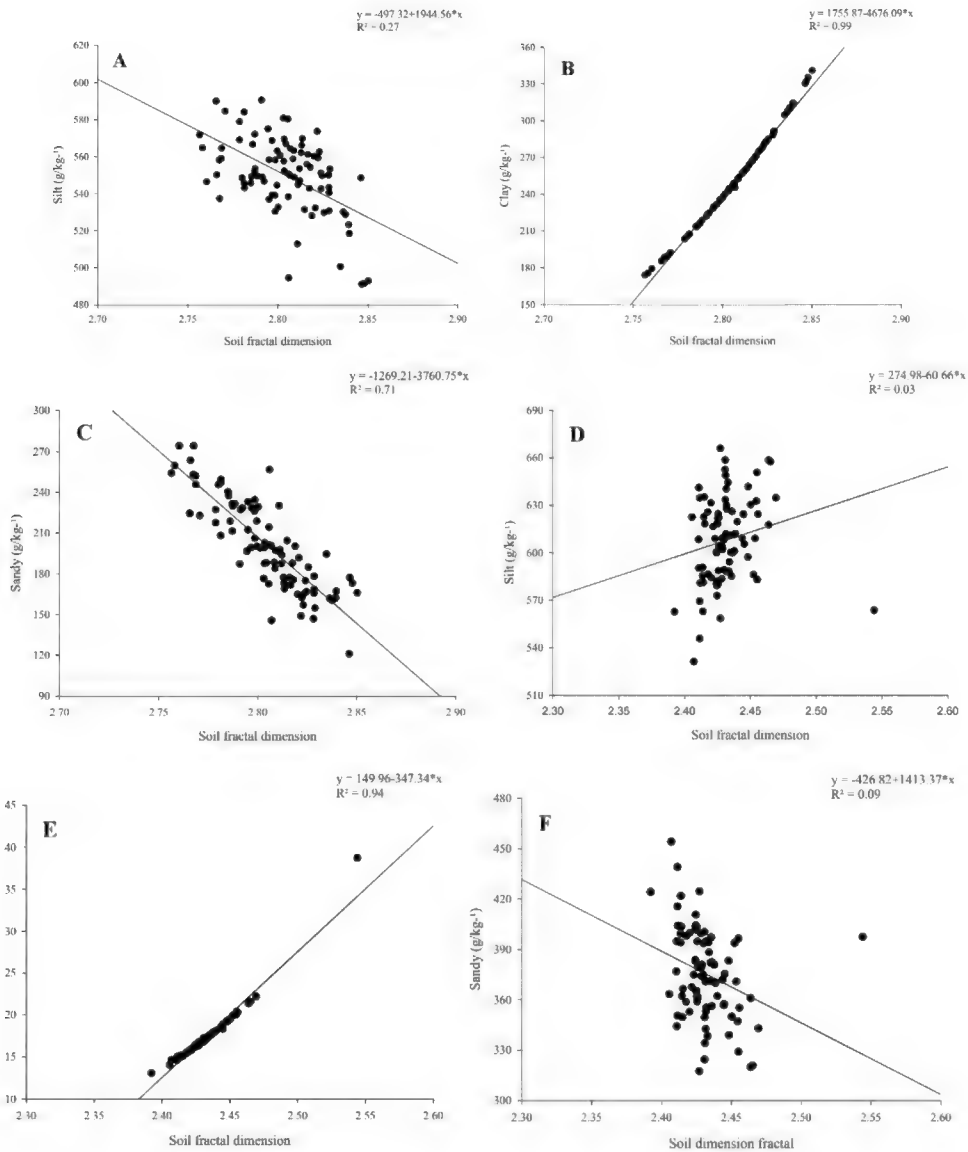



Figure 2. Relationship between fractal dimension and particle size distribution on black archeological ground under different uses in the Western Amazon. A-B-C: Cocoa area; D-E-F: cooffe area.

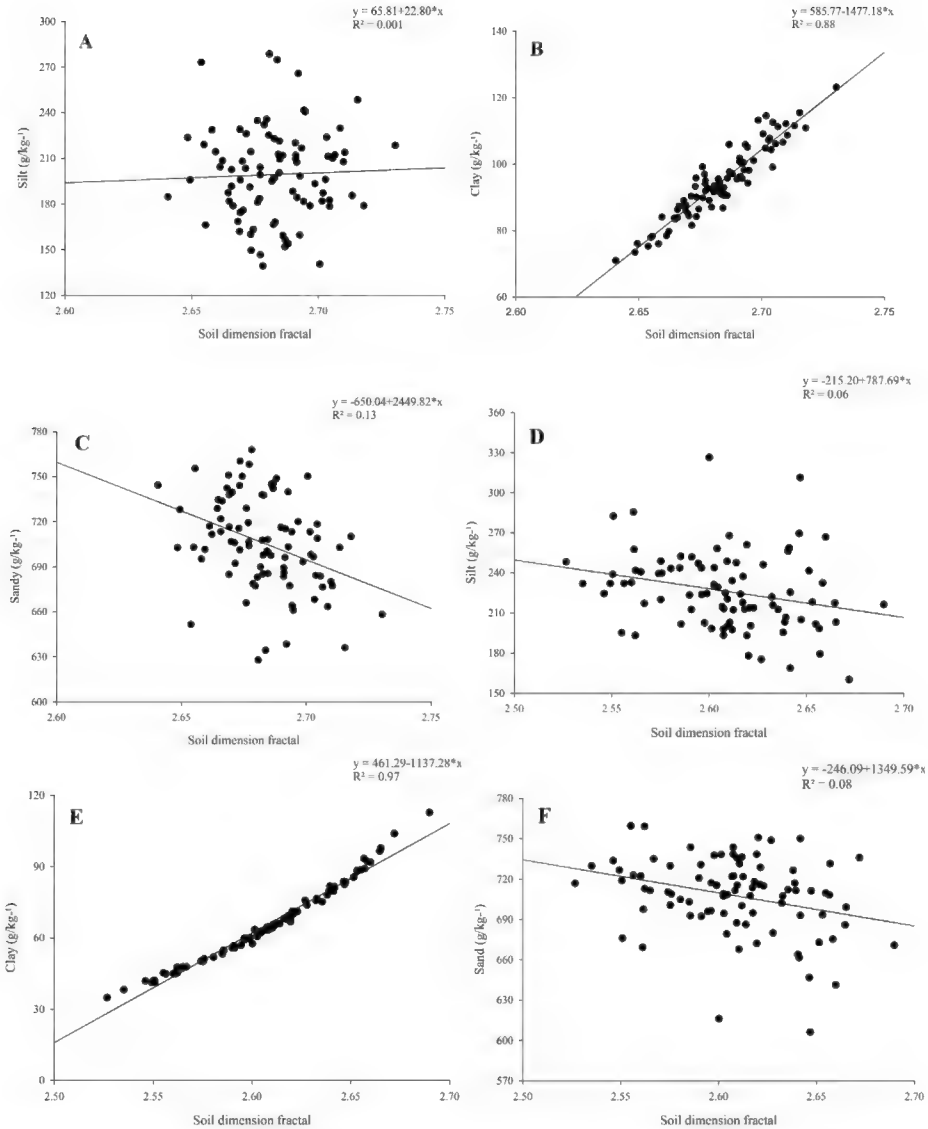


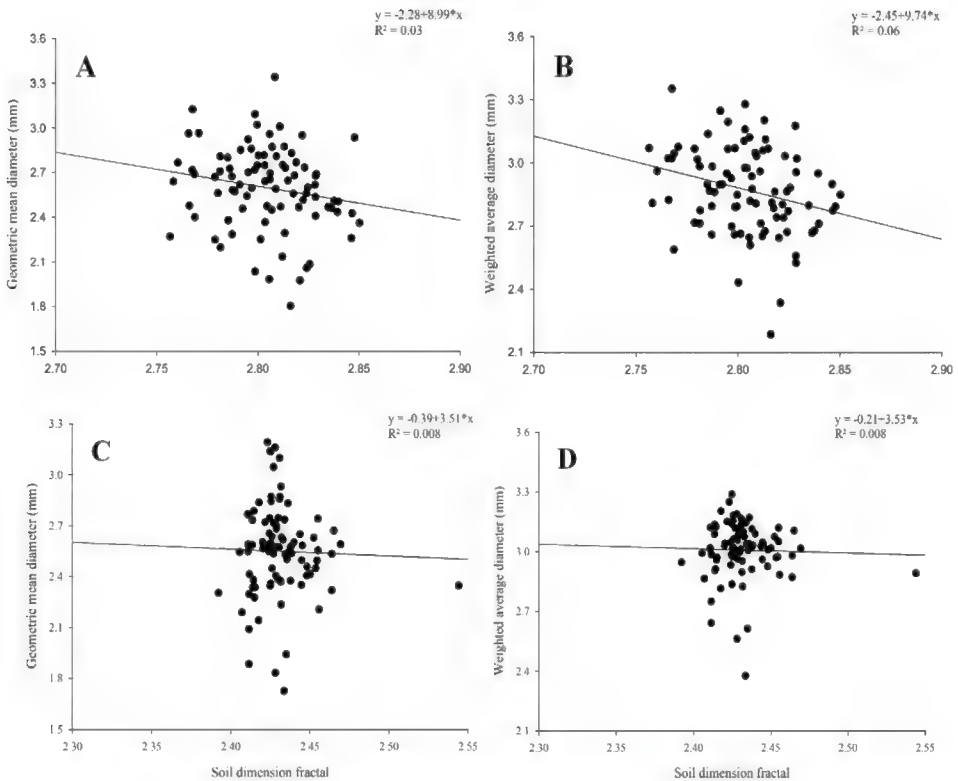

Figure 3. Relationship between fractal dimension and particle size distribution on black archeological ground under different uses in the Western Amazon. A-B-C: Forest area; D-E-F: Grassland area.

## Relationship between fractal dimension, GMD and WMD

Linear regressions were also performed to determine the relationships between D and GMD and WMD aggregation variables for the different crops (Figure 4). In spite of the other physical attributes studied, the relationships with GMD and WMD were those that presented coherent relations with the values of D, however these same values, are very low as to the determination index R2, in which area under cocoa cultivation presented ($R^2 = 0.03$

and 0.06), with a negative linear relationship (Figure 4 A-B). ADE under grassland presents constant relation, tending to a positive linear, however again the values of $R^2$ are considered extremely low varying between 0.006 for GMD and 0.008 for WMD (Figure 4 C-D), however, as previously mentioned, this specific condition does not demonstrate expressive results of adequate aggregation conditions for this area, only possible compaction effects induce this condition.

ADEs areas, present high proportions of organic carbon, being verified this condition in studies of Soares et al. (2018) in grassland in southern Amazonas and also by Silva et al. (2017) that found high levels of native forest in the South of Amazonas. In particular, the increase in total organic carbon content generally results in an increase in the size and stability of the aggregates (KAY and ANGERS, 2000). The organic carbon content in the soil may reflect the number of polysaccharides that must increase cementation between mineral particles and influence the arrangement of these particles between soil failure zones (CHENU and GUÉRIF, 1991). Therefore, the data of this work show that the fractal dimension was not expressively correlated with the stability of the aggregates, so there is some process in particular of the relation of formation of the aggregates with the PSD or organic matter of the soil.



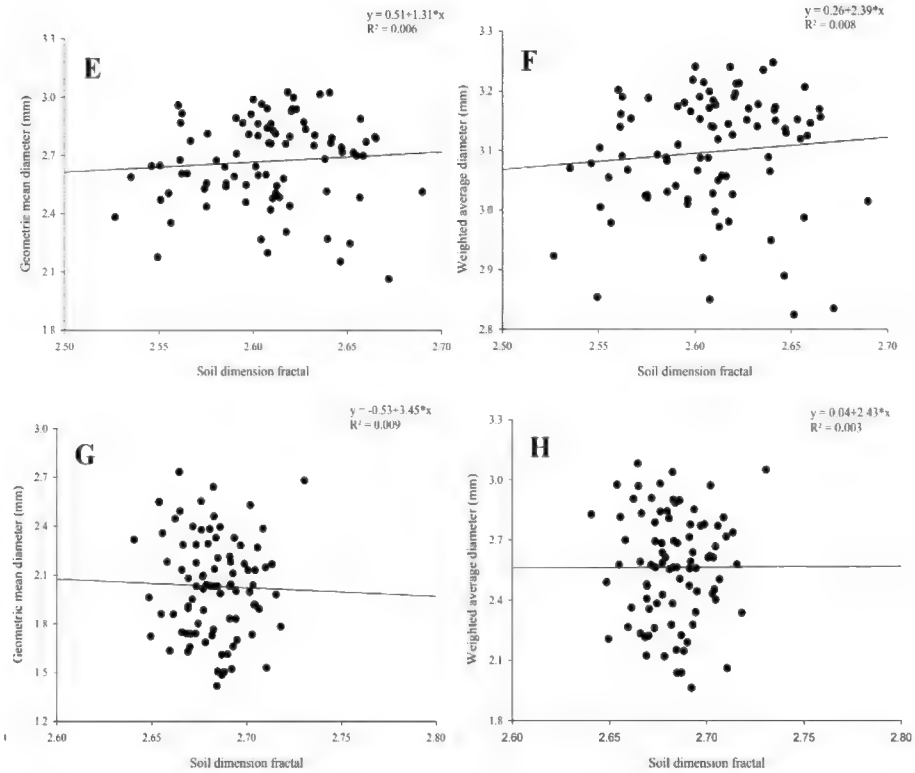



Figure 4. Relationship between fractal dimension, GMD and WMD in Archaeological Dark Earth under different uses in Western Amazonia. A-B: Cocoa area; C-D: Cooffe area; E-F: Grassland area; G-H: Forest area.

There are recognized difficulties in relating the soil structure to the specific functions exerted by them in the processes of pedogenesis (GUBER et al., 2005). Therefore, these difficulties are caused by the multiplicity of factors that affect the soil structure and multiplicity of effects that the structure has on the processes in the soil. Therefore, in spite of the complexity of the anthropic process of ADE formation, the aggregation scale requires parameterization that can better relate the effects with fractal dimension studies, since the textural variation associated with conditions of different diameters of aggregates presented low relations.

## 4 I CONCLUSIONS

The mean fractal dimension values in the archaeological dark earth studied here indicate better soil structure in the cocoa-growing area when compared to the other sites, possibly due to the land use and management of this environment. The clay fraction directly influenced fractal dimension values in the Archaeological Dark Earth areas.

There were considerable linear relationships between the clay content in the different areas. It has been suggested that the fractal dimension of PSD may have significant implications for soil degradation or land-use structuring.

The search for informative parameters of the soil structure associating parameters of aggregation with fractal dimension, is the hope that the research in the aggregate scale can generate useful complements for the parameterization of the soil structure in Amazonian anthropic soils, evident the low relation found, thus showing the peculiar characteristic of these soils of the Amazon region.

## REFERENCES


ALVARENGA, R. C.; FERNANDES, B.; SILVA, T. C. A.; RESENDE, M. Estabilidade de agregados de um Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo e de manejo da palha do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 10, n. 2, 273-277, 1986.

ARRAES, C. L.; BUENO, C. R. P.; PISSARRA, T. C. T. Estimativa da erodibilidade do solo para fins conservacionistas na microbacia córrego do Tijuco, SP. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 6, p. 849-857, 2010. http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/7218/6604

BRASIL. **Ministério das Minas e Energia**. Projeto RADAMBRASIL, folha SB. 20, Purus. Rio de Janeiro, 1978.

CAMPOS, M. C. C.; SANTOS, L. A. C.; SILVA, D. M. P.; MANTOVANELLI, B. C.; SOARES, M. D. R. Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. **Revista Agro@mbiente Online**, Boa Vista, v. 6, n. 2, p. 102-109, 2012. http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v12i4.5166

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico em um Latossolo Roxo Distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 23, p. 527-538, 1998. http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06831998000300019

CHENU, C. & GUÉRIF, J. Mechanical strength of clay minerals as influenced by an adsorbed polysaccharide. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, n. 4, p. 1077–1080, 1992. doi:10.2136/sssaj1991.03615995005500040030x

CUNHA, J. M.; CAMPOS, M. C. C.; GAIO, D. C.; NOGUEIRA, J. S.; SOARES, M. D. R.; SILVA, D. M. P.; OLIVEIRA, I. A. Fractal analysis in the description of soil particle-size distribution under different land-use patterns in Southern Amazonas State, Brazil. **African journal of agricultural research**, Lagos, v. 11, n. 23, p. 2032-2042, 2016. DOI: 10.5897/AJAR2015.10649

DENG, Y.; CAI, C.; XIA, D.; DING, S.; CHEN, J. Fractal features of soil particle size distribution under different land-use patterns in the alluvial fans of collapsing gullies in the hilly granitic region of southern China. **Plos One**, San Francisco, v. 12, n. 3, p. 1-21, 2017. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173555

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017.

DU, Y. C.; HAN, J. C.; ZHANG, S. W.; HUANG, Y. F.; WANG, H. Y.; LUO, L. T.; ZHANG, W. H. Multidimensional analysis of particle size fractal characteristics in a farmland soil profile. **IOP Conference Series Earth and Environmental Science**, Bistrol, v. 52, n. 1, p. 1-10, 2017. DOI: 10.1088/1742-6596/52/1/012053

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3ª ed. Brasília, DF; 2013.

FILGUEIRA, R. R.; FOURNIER, L. L.; CERISOLA, C. I.; GELATI, P.; GARCIA, M. G. Particle-size distribution in soils: A critical study of the fractal model validation. **Geoderma**, Amsterdã, v. 134, n. 3, p. 327-334, 2006. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.03.008

GROSSMAN, R. B. & REINSCH, T. G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J. H. & TOPP, C., eds. Methods of soil analysis: Physical methods. **Soil Science Society of America**, p. 201-228, 2002.

GUBER, A. K.; PACHEPSKY, Y. A.; LEVKOVSKY, E. V. Fractal mass–size scaling of wetting soil aggregates. **Ecological Modelling**, Estados Unidos, v. 182, n. 3-4, p. 317-322, 2005. DOI: 10.1016/S0304-3800(04)00166-8

HUANG, Z.; CHEN, J.; AI, X.; LI, R.; AI, Y.; LI, W. The texture, structure and nutrient availability of artificial soil on cut slopes restored with OSSS – Influence of restoration time. **Journal of Environmental Management**, Estados Unidos, v. 200, n. 1, p. 502-510, 2017. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.05.043

KAY, B. D. & ANGERS, D. A. **Soil structure**. In: Sumner, M. E. (Ed.), Handbook of Soil Science. p. 229–276, 2000.

KEMPER, W. D. & CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: Black, C. A.; Evans, D. D.; White, J. L.; Ensminger, L. E.; Clark, F. E. (Ed) Methods of soil analysis-Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Agronomy Series 9. **American Society of Agronomy**, Madison, p. 499-510.

KETTERINGS, Q. M.; BIGHAM J. M.; LAPERCHE, V. Changes in soil mineralogy and texture caused by slash and burn fires in Sumatra, Indonesia. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 64, n. 3, p. 1108-1117, 2000. doi:10.2136/sssaj2000.6431108x

KRAVCHENKO, A.; ZHANG, R. D. Estimating the soil water retention from particle-size distribution: a fractal approach. **Journal Soil Science**, Estados Unidos, v. 163, n. 3, p. 171–179, 1998. DOI: 10.1097/00010694-199803000-00001

LIAO, K.; LAI, X.; ZHOU, Z.; ZHU, Q. Applying fractal analysis to detect spatio-temporal variability of soil moisture content on two contrasting land use hillslopes. **Catena**, Alemanha, v. 157, p. 163-172, 2017. DOI: 10.1016/j.catena.2017.05.022

LIU, X.; ZHANG, G.; HEATHMAN, G. C.; WANG, Y.; HUANG, C. H. Fractal features of soil particle-size distribution as affected by plant communities in the forested region of Mountain Yimeng, China. **Geoderma**, Amsterdã, v. 154, n. 1, p. 123-130, 2009. DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.10.005

MANDELBORT, B. B. **The Fractal Geometry of Nature**. WH Freeman, San Francisco, pp. 45–256, 1982.

MANTOVANELLI, B. C.; SILVA, D. A. P.; CAMPOS, M. C. C.; GOMES, R. P.; SOARES, M. D. R.; SANTOS, L. A. C. Avaliação dos atributos do solo sob diferentes usos na região de Humaitá, Amazonas. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 58, n. 2, p. 122-130, 2015. http://dx.doi.org/10.4322/rca.1822

MOTA JÚNIOR, P. C.; CAMPOS, M. C. C.; MANTOVANELLI, B. C.; FRANCISCON, U.; CUNHA, J. M. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em terra preta de índio sob cultivo de café Conilon. **Cooffe Science**, Viçosa, v. 12, n. 2, p. 260-271, 2017. http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/8663

R CORE TEAM. **A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2013. Available in: <https://www.r-project.org/>.

SILVA, F. A. S.; Azevedo, C. A. V. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research**, Lagos, v. 11, n. 39, p. 3733-3740, 2016. DOI: 10.5897/AJAR2016.11522

SILVA, L. F. D.; CUNHA, J. M.; CAMPOS, M. C. C.; LIMA, A. F. L.; PANTOJA, J. C. M.; SOARES, M. D. R.; MANTOVANELLI, B. C. Variabilidade espacial de agregados e estoque de carbono em solos antropogênicos sob floresta nativa. **Nativa**, Sinop, v. 5, (especial), p. 540-547, 2017. http://dx.doi.org/10.5935/2318-7670.v05nespa12

SOARES, M. D. R.; CAMPOS, M. C. C.; CUNHA, J. M.; MANTOVANELLI, B. C.; OLIVEIRA, I. A.; BRITO FILHO, E. G.; LEITE, A. F. L. Variabilidade espacial da estabilidade dos agregados e matéria orgânica do solo em terra preta arqueológica sob pastagem. **Gaia Scientia**, Recife, v. 12, n. 1, p. 125-133, 2018. DOI: 10.22478/ufpb.1981-1268.2018v12n2.34416

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12th ed. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2014.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 795-801, 2002. http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162002000400026

TURCOTTE, D. L. Fractal fragmentation. **Journal of Geophysical Research**, v. 91, p. 1921–1926, 1986.

TYLER, S. W.; WHEATCRAFT, S. W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, n. 4, p. 987–996, 1989. DOI: 10.2136/sssaj1989.03615995005300040001x

XIA, D.; DENG, Y.; WANG, S.; DING, S.; CAI, C. Fractal features of soil particle-size distribution of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region, south China. **Natural Hazards**, Basingstoke, v. 79, n. 1, p. 455-478, 2015. https://doi.org/10.1007/s11069-015-1852-1

XU, G.; LI, Z.; LI, P. Fractal features of soil particle-size distribution and total soil nitrogen distribution in a typical watershed in the source area of the middle Dan River, China. **Catena,** Alemanha, v. 101, p. 17-23, 2013.

ZONEAMENTO ECOLÓGICO ECONÔMICO – ZEE. **Zoneamento Ecológico Econômico do Sul-Sudeste do Amazonas**. Instituto de Proteção Ambiental da Amazônia (IPAAM), Manaus, 2008.

# CAPÍTULO 14

# SPATIAL VARIATION OF CHEMICAL ATTRIBUTES IN ARCHAEOLOGICAL DARK EARTH UNDER COCOA CULTIVATION IN WESTERN AMAZON

*Data de aceite: 18/05/2021*
*Data de submissão: 11/05/2021*

**Roneres Deniz Barbosa**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://orcid.org/0000-0003-3325-8625

**Alan Ferreira Leite de Lima**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
https://orcid.org/0000-0001-7959-8778

**Elilson Gomes de Brito Filho**
Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal da Paraíba
Areia - Paraíba
https://orcid.org/0000-0001-6718-2126

**Milton César Costa Campos**
Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal da Paraíba
Areia - Paraíba
https://orcid.org/0000-0002-8183-7069

**José Maurício da Cunha**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
https://orcid.org/0000-0003-4057-1708

**Bruno Campos Mantovanelli**
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria – Rio Grande do Sul
https://orcid.org/0000-0003-4291-1729

**Douglas Marcelo Pinheiro da Silva**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://orcid.org/0000-0001-8147-5726

**Fernando Gomes de Souza**
Universidade Federal de Roraima
Boa Vista – Roraima
https://orcid.org/0000-0001-5653-3939

**ABSTRACT:** Archeological Dark Earths (ADEs) are fertility soils that are notoriously superior to the vast majority of soils typical of the Amazon region. The study on ADEs has intensified due to the goodcharacteristics presented by these soils, such as high concentration of nutrients (phosphorus, calcium, magnesium). In this sense, the aim of this study was to evaluate the spatial distribution of soil chemical attributes in an area of black archeological earth soil under cocoa cultivation in the municipality of Apuí (AM). The mapping of a 42 x 88 m mesh, with irregular spacing of 6 x 8 m, totaling 88 points, was carried out, and then soil samples were collected at depths of 0.0-0.05; 0.05-0.10; (pH, O.C, Sto C, (H+Al), P, K, Ca, Mg, SB, CEC and V%). Data were analyzed using descriptive and geostatistical statistics techniques. The mean and median values were adjusted to the near values, indicating normal distribution, while the soil chemical attributes were adjusted to the spherical and exponential semivariograms models. The majority of the attributes presented coefficient of variation (CV) between 12.1 and

60%, characterized as average variability, the variables in the study presented different ranges and most of them had a strong spatial dependence. The geostatistical techniques used allowed the adjustments of the theoretical models that best represented the experimental semivariance, thus enabling the construction of thematic maps of the spatial distribution of the values of the attributes of the studied area.
**KEYWORDS:** Soil attributes, Descriptive statistics, Geostatistics, Apuí, Spatial distribution.

## VARIAÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS EM TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA SOB CULTIVO DE CACAU NA AMAZONIA OCIDENTAL

**RESUMO:** As Terras Pretas Arqueológicas (TPAs) são solos de fertilidade que notoriamente são superiores à grande maioria dos solos típicos da região amazônica. Assim, o uso das TPAs intensificou-se devido às características químicas apresentadas por esses solos, como a alta concentração de nutrientes (fósforo, cálcio, magnésio). Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar a distribuição espacial dos atributos químicos do solo em uma área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí (AM). O mapeamento de uma malha de 42 x 88 m, com espaçamento irregular de 6 x 8 m, totalizando 88 pontos, foi realizado e, em seguida, foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0,0-0,05; 0,05-0,10; (pH, O.C, Sto. C, (H + Al), P, K, Ca, Mg, SB, CEC e V%). Os dados foram analisados por meio de técnicas estatísticas descritivas e geoestatísticas. Os valores médios e medianos foram ajustados aos valores próximos, indicando distribuição normal, enquanto os atributos químicos do solo foram ajustados aos modelos de semivariogramas esféricos e exponenciais. A maioria dos atributos apresentou coeficiente de variação (CV) entre 12,1 e 60%, caracterizada como variabilidade média, as variáveis do estudo apresentaram diferentes faixas e a maioria teve forte dependência espacial. As técnicas geoestatísticas utilizadas permitiram os ajustes dos modelos teóricos que melhor representaram a semivariância experimental, possibilitando a construção de mapas temáticos da distribuição espacial dos valores dos atributos da área estudada.
**PALAVRAS-CHAVE:** Atributos do solo, Estatística descritiva, Geoestatística, Apuí, Distribuição espacial.

## 1 I INTRODUCTION

The Amazon region is characterized by the enormous diversity of life, both plant and animal, as well as human societies (PESSOA JUNIOR et al., 2012). Most of the arable soils of this region are acidic, with low cation exchange capacity (CEC) and low natural fertility. This region is characterized by its advanced stage of weathering, presenting physical characteristics suitable for agricultural use, however with strong nutritional limitations (LIMA et al., 2006, CUNHA et al., 2007).

In contrast, there are records of soil areas that have been affected by pre-historic man, which have a dark color, remains of archeological materials (ceramic fragments and lithic artifacts) and high $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, Zn, Mn, P, and the black soil of this layer is commonly known as Archeological Dark Earths (ADEs), "*Terra Preta de Indio*" (TPI) or Black Earth

(BE) (KERN and KÄMPF, 1989).

According to German (2003), these areas of ADE are found adjacent to water courses, occupying floodplain areas, marginal rises, with expansion ranging from one to hundreds of hectares, along rivers and inter-rivers. These potentially agricultural areas are being extensively explored in the Amazonian environment, but inadequate use and management can cause undesirable changes in the natural ecosystem, leading to soil degradation (CAMPOS et al., 2012). Thus, the studies of the transformations resulting from the use and management of the soils is of great importance for the adoption of more compatible systems for each type of evaluated area (ROZANE et al., 2010).

As regards chemical properties, Archeological Dark Earths have characteristics that supplant the natural conditions of the adjacent soils of the Amazon region that typically present low retention of nutrients due to the low concentration of organic material incorporated in the soil as the occurrence of the natural fields that present high aluminum concentration, resulting in low values and pH, according to Mantovanelli et al. (2016); Viana et al. (2016).

When trying to know the variability in the soil, difficulties are encountered and this is due to two factors: firstly because of the great territorial extension of the Amazon region and few researchers, the number of samples in the spatial variability studies, besides the lack of knowledge and choice of a pattern in the use of sample spacing (OLIVEIRA et al., 2015). Currently one of the tools to verify the existence of the variability in the environment is geostatistics, it has allowed to analyze characteristics and their random and spatial aspects, creating an image of the variability of characters, identifying the degree of spatial dependence and providing information that allows subsidizing the study of the phenomena to be analyzed (SILVA NETO et al., 2012).

In this sense, the study of spatial dependence presents itself as an alternative not only to reduce the effects of soil variation on crop production, but also to estimate responses of soil properties due to certain management practices, besides allowing the reduction of the effects of horizontal and vertical soil variability, in many cases, may even influence the interpretation of its effects (Souza et al., 2004). In addition, a number of studies have demonstrated that the chemical attributes of the soil present intense spatial dependence, verified by geostatistical analysis (CAMPOS et al., 2007; ZANÃO JÚNIOR et al., 2007; MARQUES JÚNIOR et al., 2008; LIMA et al., 2013).

Therefore, the objective of this work was to evaluate the spatial variation of chemical attributes in Archeological Dark Earth area under cocoa cultivation in the Western Amazon.

## 2 | MATERIALS AND METHODS

### Characterization of the physical environment

The study area is located in the municipality of Apuí, Amazonas, Brazil, located along the Transamazônica highway (BR-230), under the geographic coordinates of 7° 12' 05 "S and 59° 39' 37" W. According to Köppen classification the climate of the region belongs to group A (Tropical Rainy Weather) and climatic type Am (monsoon rainfall), presenting a dry period of short duration. The rainfall is limited by the isoietas of 2,250 and 2,750 mm, with rainy period beginning in October and extending until June. Annual mean temperatures range from 25 °C to 27 °C and relative moisture between 85 and 90% (Figure 1).

The geology of the region presents sandstones of the beneficent formation, covered by clay pack of the tertiary. In relation to the soils present in the municipality, the following classes predominate: Ultisols and Oxisols, and the soil of the study area was classified as Argissolo Amarelo the according to Embrapa (2013) and Typic Haplohumult the according to Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2010).

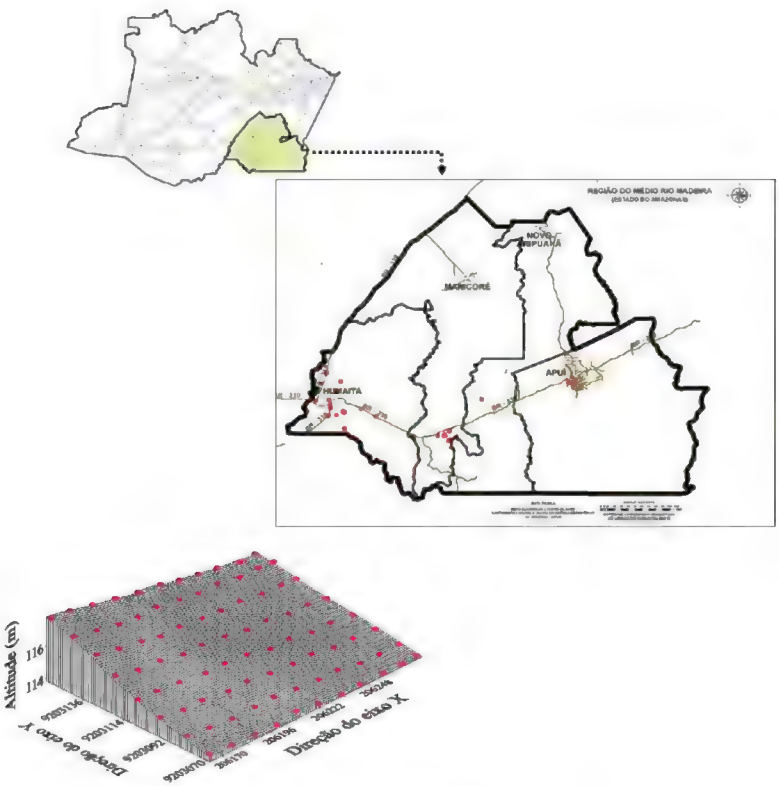



Figure 1. Map of the southern region of the Amazon.

Source: Adapted from Santos (2011).

The characteristic vegetation of this region is the Dense Tropical Forest consisting of densified and multi-layered trees between 20 and 50 meters in height. According to Campos (2012), the predominant landscapes of this region are the natural fields, natural fields/forests. The BAE area has been cultivated for fourteen years, during the first six years it has been used to cultivate rice, maize, beans and watermelon, and the cocoa culture that has remained until the present study has been inserted.

## Soil sampling and chemical measurements

The survey was carried out between August and December 2014, in this place the mapping of a 42 x 88 m mesh, with spacings of 6 x 8 m, totaling 88 sampling points at depths 0.0-0.05; 0.05-0.10; 0.10-0.20 m. At the crossing points of the mesh, soil blocks with preserved structure were collected at depths of 0.0-0.05; 0.05-0.10; 0.10-0.20 m, to determine soil chemical attributes.

The pH was determined potentiometrically using water, in soil ratios: 1: 2.5 solution. $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$ and $Al^{3+}$ were extracted with 1.0 mol $L^{-1}$ KCl and titrated by titration. The P and $K^{+}$ were extracted with Mehlich$^{-1}$, the P measured by spectrophotometry, the $K^{+}$ by flame photometry. Potential acidity (H+Al) was extracted with 0.5 mol $L^{-1}$ calcium acetate and titrated by titration (EMBRAPA, 2011).

The TOC was determined by wet combustion with potassium dichromate and titrated by titration from the *Walkley and Black* method modified by Yeomans and Bremner (1988).

The storage organic carbon (Sto C) was determined at all collection depths and was calculated by the expression (WELDKAMP, 1994).

Sto C = (TOC x BD x e) / 10,

where:

Sto C = Storage organic carbon (Mg $ha^{-1}$);

TOC = total organic carbon content (g $kg^{-1}$);

BD = Bulk Density (kg $dm^{-3}$);

e = thickness of the layer considered (m).

Based on the results of the chemical analyzes, sums bases (SB), cation exchange capacity (CEC), base saturation (V %).

## Statistical and geostatistical analysis

Soil attributes were analyzed by means of descriptive statistical analysis, being determined the mean, median, coefficient of variation, skewness and kurtosis coefficient. The Kolmogorov-Smirnov (KS) test ($p \leq 0.05$) was performed using Minitab 14 software (MINITAB, 2000).

Geostatistics was used to evaluate the spatial variability of the attributes studied, according to Vieira et al. (1983). In order to do the geostatistical analysis, it was necessary to know if there was spatial dependence or not of the attributes studied, which can be

verified by means of the semivariogram graph.

The semivariogram is a graphical representation of the semivariance y (h), represented in the Y coordinate, as a function of a given distance (h), represented in the X coordinate. In order to characterize the spatial variability, geostatistical analysis was used (Isaaks and Srivastava, 1989). Based on the assumption of stationarity of the intrinsic hypothesis, which the semivariogram is estimated by equation (1):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \qquad (1)$$

Where: γ (h) - the value of the semivariance for a distance h; N (h) - number of pairs involved in the semivariance calculation; Z (xi) - value of attribute Z in position xi; Z (xi + h) - value of attribute Z separated by a distance h from position xi.

The adjustments of the experimental models to the semivariogram were based on the higher value of the coefficient of determination and the smaller value of the square root of the mean error, and the choice of the best fit was performed using the "*Jack-Knifing*" technique according to Vieira et al. (1983).

In order to analyze the degree of spatial dependence of soil attributes, Cambardella et al. (1994) classification was used, in which the semivariogram is considered a strong spatial dependence that has a nugget effect of <25% of the plateau, moderate when it is between 25 and 75% and weak > 75%.

After adjustment of the permissible mathematical models, the data were interpolated using kriging. Thus, the inverse of the square of the distance was used as interpolator for the attributes that did not present structure of spatial dependence. The geostatistical analysis was performed in Surfer software version 8.0 (GOLDEN SOFTWARE, 2002).

## 3 | RESULTS AND DISCUSSION

### Descriptive statistics of chemical attributes

The pH values in water in the evaluated layers ranged from 6.23 to 5.7 (Table 1). These results are similar to those found by Santos et al. (2013); Viana et al. (2016) from 4.3 to 6.6. The differences in pH variation in the soil studied with the other studies show the heterogenic nature of the occurrence of ADEs, either by the pedoenvironmental conditions or by the human activity in each place, in this way we can affirm that the pH indexes are presented as one of the indicative of the high natural fertility of these soils, in many cases pH values always higher than 5.5.

The $Ca^{2+}$ and $Mg^{2+}$ contents were higher in the superficial layer of 0.0-0.05 m and 0.05-0.10 m, who stated that, in general, ADEs exhibit high levels of nutrients, mainly Ca and P, from human and animal bone remains, as well as the formation of highly stable organic matter-calcium complexes (NOVOTNY et al., 2007; SANTOS et al., 2013).

The saturation by bases revealed high values in all layers evaluated between 77.25% and 52.65%, characterizing them as well as eutrophic soils. Probably, the impact of anthropic action is not limited to the surface horizons, but it can alter the soil in depth, as a drastic reduction occurs with increasing depth (KERN and KÄMPF, 2005).

The levels of available phosphorus were high in the anthropogenic horizons, with a tendency to increase in depth, varying from 93.7 to 124.34 mg $dm^{-3}$, corroborating Campos et al. (2012); Santos et al. (2013); Viana et al. (2016). These results are due to the intensity of the incorporation of debris by the ancient inhabitants, as highlighted by Fraser & Clement (2008), in a study on ADE soils in the Amazon region. The levels of exchangeable $Al^{3+}$ were low in all strata evaluated (Table 1), similar to those observed Campos et al. (2012).

In relation to the cation exchange capacity (CEC), there was a clear trend of CEC decrease with soil depth, a behavior also observed by Glaser et al. (2000) and Santos et al. (2013) in studies of ADEs in the Amazon. The highest base sum results were observed in the superficial layer of 0.0-0.05 m, when comparing subsurface layers, which ranged from 21.77 to 12.59 cmolc $dm^{-3}$, thus indicating the tendency of base reduction when increasing depth and increase occur relative to the $Al^{3+}$ content.

The organic carbon (O.C) contents ranged from 55.31 to 31.31 g $kg^{-1}$, decreasing with soil depth. Similar results were obtained by Campos et al. (2012); Santos et al. (2013). The high carbon content in the ADEs can be attributed to the composition of organic matter rich in pyrogenic carbon (coal), added to the soil by the activity of pre-Columbian indigenous peoples (GLASER et al., 2000). In relation to the storage carbon, the high indexes are attributed to the anthropic changes that this soil suffered in its formation. Falcão and Borges (2006) report that ADE areas present high levels of organic matter and more intense biological activity than non-anthropogenic soils, the authors say that these high values can come from human and animal remains.

The results referring to the descriptive analysis of the chemical attributes are presented in (Table 1). The values of the central tendency measures (mean and median) are close for all variables, justifying values of skewness and kurtosis close to zero, except for acidity and V% at depth 0.05 - 0.10 m and $Al^{3+}$and V% at depth 0.10-0.20 m.

The skewness coefficient is used to characterize how and how much the frequency distribution moves away from the symmetry. So that if the value found for this coefficient is zero, the distribution is symmetric, if positive, the distribution is asymmetric on the right, and if negative, is asymmetric on the left (ALHO et al., 2014). Taking into account this understanding, it was verified that most of the variables presented positive asymmetric coefficients, except for the variables Ca, SB and V% in the layer 0.0-0.05 m; SB, CEC and V% in the 0.05-0.10 m layer and O.C, H+Al and CEC in the respective 0.10-0.20 m layer, both exceptions characterized as negative asymmetric coefficients (Table 1). Although asymmetric distributions were found, there was some evidence that, because of the similarity between the mean and median values and the results of the skewness and

kurtosis coefficients close to zero, they presented for most of the evaluated variables, these results show That measures of central tendency are not dominated by atypical values in the distribution. According to Cambardella et al. (1994), such results indicate that the data are suitable for the application of geostatistics.

In relation to the classification of the coefficient of variation (CV) proposed by (Warrick & Nielsen, 1980), it was observed that the pH and CEC variables in depth 0.0 - 0.05 m, and O.C and CEC in depth 0.05 - 0.10 m and CEC at depth 0.10 - 0.20 m presented low variability of data, while all others presented medium variability. No attribute, therefore, presented high variability. Taking into account the standards established by Nogueira (2007), which states that a coefficient of variation greater than 35% reveals that the series is heterogeneous and the mean has little meaning, and if it is greater than 65%, the series is described as very heterogeneous and the mean has no meaning, but if, however, it is less than 35%, the series is homogeneous and the mean has significance and can be used as representative of the series. Series from where it was obtained. In this way, according to the results we can say that most of the attributes behaved presenting series of homogeneous data and the mean presenting meaning.

| Descriptive Statistics | Mean | Median | SD | [1]CV (%) | Min. | Max. | Skewness | Kurtosis | d |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 0.0 - 0.05 m | | | | | |
| pH ($H_2O$) | 6.23 | 6.08 | 0.65 | 10.43 | 4.49 | 7.53 | 0.08 | -0. 56 | $0.03^{ns}$ |
| O.C (g $kg^{-1}$) | 55.31 | 54.71 | 10.94 | 19.77 | 27.96 | 83.76 | 0.19 | 0.04 | 0.20* |
| Sto C (g $kg^{-1}$) | 24.74 | 23.39 | 5.32 | 21.50 | 11.60 | 38.97 | 0.24 | -0.01 | $0.00^{ns}$ |
| H+Al ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 6.54 | 6.43 | 3.44 | 52.59 | 1.16 | 15.06 | 0.36 | -0.59 | 0.07* |
| $Al^{3+}$ ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 0.06 | 0.06 | 0.01 | 16.66 | 0.04 | 0.10 | 0.26 | -0.54 | $0.00^{ns}$ |
| P (mg $dm^{-3}$) | 93.70 | 94.12 | 32.73 | 34.93 | 30.38 | 170.66 | 0.33 | -0.43 | 0.20* |
| K ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 33.33 | 0.00 | 0.05 | 0.55 | -0.29 | $0.04^{ns}$ |
| Ca ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 19.57 | 20.00 | 3.20 | 16.35 | 12.75 | 26.25 | -0.29 | -0.50 | 0.20* |
| Mg ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 2.12 | 2.13 | 1.06 | 50.00 | 0.25 | 5.00 | 0.47 | -0.09 | 0.20* |
| SB ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 21.77 | 21.76 | 3.27 | 15.03 | 13.27 | 27.75 | -0.53 | -0.09 | 0.20* |
| CEC ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 28.28 | 28.06 | 2.78 | 9.83 | 21.90 | 34.35 | 0.01 | -0.33 | 0.20* |
| V% | 77.25 | 76.85 | 11.25 | 14.56 | 47.74 | 94.81 | -0.42 | -0.32 | 0.20* |
| | | | | 0.05 - 0.10 m | | | | | |
| pH ($H_2O$) | 6.13 | 6.01 | 0.78 | 12.72 | 4.78 | 7.78 | 0.48 | -0.55 | 0.05* |
| O.C (g $kg^{-1}$) | 40.41 | 39.40 | 4.15 | 10.26 | 30.56 | 51.40 | 0.31 | -0.09 | $0.01^{ns}$ |
| Sto C (g $kg^{-1}$) | 19.36 | 18.98 | 2.85 | 14.72 | 13.83 | 26.53 | 0.52 | -0.03 | 0.20* |
| H+Al ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 9.15 | 8.58 | 4.97 | 54.31 | 0.99 | 19.64 | 0.19 | -1.00 | 0.15* |
| $Al^{3+}$ ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 0.07 | 0.08 | 0.03 | 42.85 | 0.03 | 0.17 | 0.76 | 0.33 | $0.00^{ns}$ |
| P (mg $dm^{-3}$) | 109.61 | 110.62 | 33.63 | 30.68 | 35.22 | 198.32 | 0.01 | -0.25 | 0.20* |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| K ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 33.33 | 0.01 | 0.05 | 0.40 | -0.14 | 0.17* |
| Ca ($cmol_c$ $kg^{-3}$) | 11.60 | 11.95 | 3.95 | 34.05 | 3.40 | 21.50 | 0.20 | -0.32 | $0.02^{ns}$ |
| Mg ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 4.05 | 4.00 | 1.47 | 36.29 | 0.95 | 7.10 | 0.06 | -0.79 | 0.20* |
| SB ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 15.89 | 15.91 | 4.65 | 29.26 | 5.16 | 24.81 | -0.09 | -0.74 | 0.20* |
| CEC ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 25.75 | 25.90 | 2.05 | 7.96 | 20.98 | 29.83 | -0.14 | -0.62 | 0.20* |
| V% | 63.96 | 64.89 | 18.33 | 28.65 | 30.87 | 96.02 | -0.05 | -1.06 | 0.18* |
| 0.10 - 0.20 m | | | | | | | | | |
| pH ($H_2O$) | 5.70 | 5.52 | 0.75 | 13.15 | 4.58 | 7.95 | 0.88 | 0.10 | $0.00^{ns}$ |
| O.C (g $kg^{-1}$) | 31.31 | 31.78 | 5.45 | 17.40 | 20.11 | 43.45 | -0.15 | -0.35 | 0.20* |
| Sto C (g $kg^{-1}$) | 29.81 | 29.68 | 6.18 | 20.73 | 13.86 | 45.62 | 0.04 | 0.03 | 0.20* |
| H+Al ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 11.53 | 12.12 | 4.98 | 43.19 | 1.32 | 22.11 | -0.22 | -0.96 | 0.08* |
| Al ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 0.08 | 0.08 | 0.03 | 37.50 | 0.04 | 0.20 | 1.12 | 0.51 | $0.00^{ns}$ |
| P (mg $dm^{-3}$) | 124.34 | 126.23 | 30.39 | 24.44 | 48.29 | 191.64 | 0.04 | -0.22 | 0.20* |
| K ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 50.00 | 0.00 | 0.05 | 0.91 | 0.26 | $0.00^{ns}$ |
| Ca ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 10.47 | 10.31 | 4.29 | 40.97 | 2.75 | 20.38 | 0.40 | -0.44 | 0.20* |
| Mg ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 1.99 | 2.00 | 1.00 | 50.25 | 0.38 | 4.88 | 0.43 | -0.15 | 0.20* |
| SB ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 12.59 | 12.46 | 4.40 | 34.94 | 5.51 | 22.78 | 0.31 | -0.85 | 0.05* |
| CEC ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 24.46 | 24.61 | 1.88 | 7.68 | 20.36 | 29.25 | -0.25 | -0.12 | $0.02^{ns}$ |
| V% | 52.65 | 51.69 | 19.06 | 36.20 | 23.07 | 93.78 | 0.33 | -1.04 | $0.02^{ns}$ |

SD = Standard Deviation, CV = Coefficient of Variation, Min = Minimum, Max = Maximum, d = Normal test of Kolmogorov Smirnov, * Significant at the 5% probability level, OC = Organic Carbon; CEC = Cation Exchange Capacity, SB = Sum Base, V% = Saturation Base, Sto C = Storage organic carbon.

Table 1. Descriptive statistics of chemical attributes on Archeological Dark Earth under Cacao cultivation in Western Amazonia.

## Geostatistical analysis

The chemical attributes of the soil were adjusted to the spherical and exponential semivariograms models (Table 2). Studies related to the spatial variability of soil attributes have shown that the spherical and exponential models have been the most frequent (AMADO et al., 2009; SANCHEZ et al., 2009; SIQUEIRA et al., 2010; DALCHIAVON et al., 2012). In addition, therefore, the adjusted models found in the present study are in agreement with the research done on soil variability. Another factor observing in the present results was the predominance of the adjustment to the spherical semivariogram model, in the depths 0.0-0.05 m and 0.05-0.10 m. In this work, the spherical model is the most cited by researchers as being more common in studies related to the attributes of soil and plant (VIEIRA et al., 2011).

All the chemical attributes studied showed a coefficient of determination ($R^2$) above 0.70 (Table 2), that is, at least 70% of the variability in the values of the estimated semivariance are explained by the adjusted models (CAMPOS et al., 2007). According to Azevedo (2004) when $R^2$ is higher than 0.5, the better the estimation of values by the ordinary kriging method. The cross-validations representing the adjusted models showed a good performance, with values varying from 0.75 to 0.98.

At the distance at which the semivariance stabilizes is considered the extent of

spatial dependence. The variables that underwent different spatial dependence, the lowest range was $K^+$ (12 m), depth 0.0-0.05 m, and the highest observed was for CEC (64 m), in the depth 0.10-0.20 m.

There were attributes that the distance of collection of the sample points in the field was not enough to characterize the spatial variability, presenting pure nugget effect. It was the case of O.C and Sto C at depth 0.0-0.05 m, and O.C at depth 0.10-0.20 m. When the studied variable is spatially independent, its $C_0$ (nugget effect) is equal to $C_1+C_0$ (plateau), known as pure nugget effect (PNE). PNE is important and indicates a random distribution, ie, unexplained variability or undetected variation, and may occur due to undetected measurements, sampling or microvariation errors, considering that the sampling spacing used is greater than necessary to detect the dependence (CAMBARDELLA et al., 1994).

The relationship between the $C_0/(C_0+C_l)$ ratio was expressed according to the classification proposed by (CAMBARDELLA et al., 1994), where the semivariograms with spatial dependence less than or equal to 25% have a strong spatial dependence. Is moderate when this ratio varies from 25 to 75% and is weak if this value exceeds 75% according to this classification. The attribute that presented a spatial dependence (SD) between 25 and 75% was only Ca, Mg and CEC at depth 0.05-0.10 m, and P and CEC and V% at depth 0.10 -0.20 m. The other attributes studied presented SD less than or equal 25%, thus presenting Zanão Júnior et al. (2007), which highlights the importance of knowledge of spatial dependence structure.

Points out that the variables that have a strong spatial dependence are more influenced by the intrinsic properties of the soil, that is, by the soil formation factors, while the moderate spatial dependence is due to the homogenization of the soil, whereas to the extrinsic attributes weak dependence (Cambardella et al., 1994).

| Parameters | Model | NE | Sill | Range (m) | SD | $R^2$ | CV |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 0.0 – 0.05 m | | | | |
| pH ($H_2O$) | Sph. | 0.01 | 0.38 | 25.00 | 2.63 | 0.85 | 0.97 |
| O.C (g $kg^{-1}$) | - | - | - | - | PNE | - | - |
| Sto C (g $kg^{-1}$) | - | - | - | - | PNE | - | - |
| H+Al ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | Sph. | 1.00 | 14.33 | 30.00 | 6.97 | 0.89 | 0.86 |
| $Al^{3+}$ ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | Sph. | 0.00 | 0.00 | 30.00 | 7.50 | 0.80 | 0.93 |
| P (mg $dm^{-3}$) | Sph. | 2980,00 | 16670,00 | 30.00 | 17.87 | 0.97 | 0.78 |
| K ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | Sph. | 0.00 | 0.00 | 12.00 | 6.00 | 0.98 | 0.75 |
| Ca ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | Sph. | 0.13 | 9.88 | 24.00 | 1.31 | 0.83 | 0.83 |
| Mg ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | Exp. | 0.10 | 0.96 | 30.00 | 10.41 | 0.89 | 0.94 |
| SB ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | Exp. | 0.91 | 9.47 | 22.50 | 9.60 | 0.83 | 0.90 |
| CEC ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | Exp. | 0.65 | 7.87 | 24.00 | 8.25 | 0.79 | 0.77 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| V% | Sph. | 31.00 | 130.90 | 29.00 | 23.68 | 0.98 | 0.90 |
| | | | 0.05-0.1 m | | | | |
| pH ($H_2O$) | Sph. | 0.01 | 0.62 | 30.00 | 0.87 | 1.61 | 0.81 |
| O.C (g $kg^{-1}$) | Sph. | 2.10 | 55.31 | 22.00 | 0.74 | 3.79 | 0.88 |
| Sto C (g $kg^{-1}$) | Sph. | 1.11 | 13.76 | 27.00 | 0.82 | 8.06 | 0.89 |
| H+Al ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | Sph. | 1.01 | 25.52 | 30.00 | 0.88 | 3.67 | 0.96 |
| $Al^{3+}$ ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | Sph. | 0.00 | 0.00 | 27.00 | 0.86 | 5.00 | 0.91 |
| P (mg $dm^{-3}$) | Exp. | 156.00 | 1407,00 | 20.00 | 0.84 | 11.08 | 0.76 |
| K ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | Exp.. | 0.00 | 0.00 | 20.00 | 0.80 | 10.00 | 0.83 |
| Ca ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | Sph. | 4.98 | 16.12 | 36.00 | 091 | 30.89 | 0.94 |
| Mg ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | Sph. | 0.70 | 2.13 | 55.80 | 0.94 | 32.86 | 0.95 |
| SB ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | Sph. | 0.53 | 19.99 | 22.00 | 0.87 | 2.65 | 0.82 |
| CEC ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | Sph. | 4.54 | 9.18 | 60.00 | 0.90 | 49.45 | 0.80 |
| V% | Sph. | 14.90 | 328.20 | 24.40 | 0.84 | 4.53 | 0.83 |
| | | | 0.1-0.2 m | | | | |
| pH ($H_2O$) | Sph. | 0.01 | 0.53 | 30.00 | 0.90 | 1.88 | 0.81 |
| O.C (g $kg^{-1}$) | - | - | - | - | - | PNE | - |
| Sto C (g $kg^{-1}$) | Sph. | 1.10 | 38.64 | 25.64 | 0.93 | 2.84 | 0.84 |
| H+Al ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | Sph. | 0.20 | 25.18 | 30.00 | 0.92 | 0.79 | 0.92 |
| $Al^{3+}$ ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | Exp. | 0.01 | 0.05 | 40.00 | 0.86 | 20.00 | 0.86 |
| P (mg $dm^{-3}$) | Exp. | 378.00 | 991.80 | 25.00 | 0.93 | 38.11 | 0.78 |
| K ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | Exp. | 0.00 | 0.00 | 15.00 | 0.98 | 3.33 | 0.73 |
| Ca ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | Sph. | 0.34 | 19.22 | 28.00 | 0.94 | 1.76 | 0.93 |
| Mg ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | Exp. | 0.10 | 1.16 | 33.00 | 0.86 | 8.62 | 0.94 |
| SB ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | Sph. | 0.60 | 17.66 | 26.20 | 0.97 | 3.39 | 0.90 |
| CEC ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | Sph. | 2.83 | 6.11 | 64.00 | 0.76 | 46.31 | 0.97 |
| V% | Sph. | 134.40 | 313.50 | 38.60 | 0.93 | 42.87 | 0.98 |

NE = Nugget effect, SD = Spatial Dependence, CV = Cross Validation, OC = Organic Carbon, CEC = Cation Exchange Capacity, SB = Sum Base, V% = Saturation Base, Sph = Spherical, Exp = Exponential, PNE = Pure Nugget Effect, Sto C = Storage organic carbon

Table 2. Estimated models and parameters to semivariograms of chemical attributes on Archeological Dark Earth under Cacao cultivation in Western Amazonia.

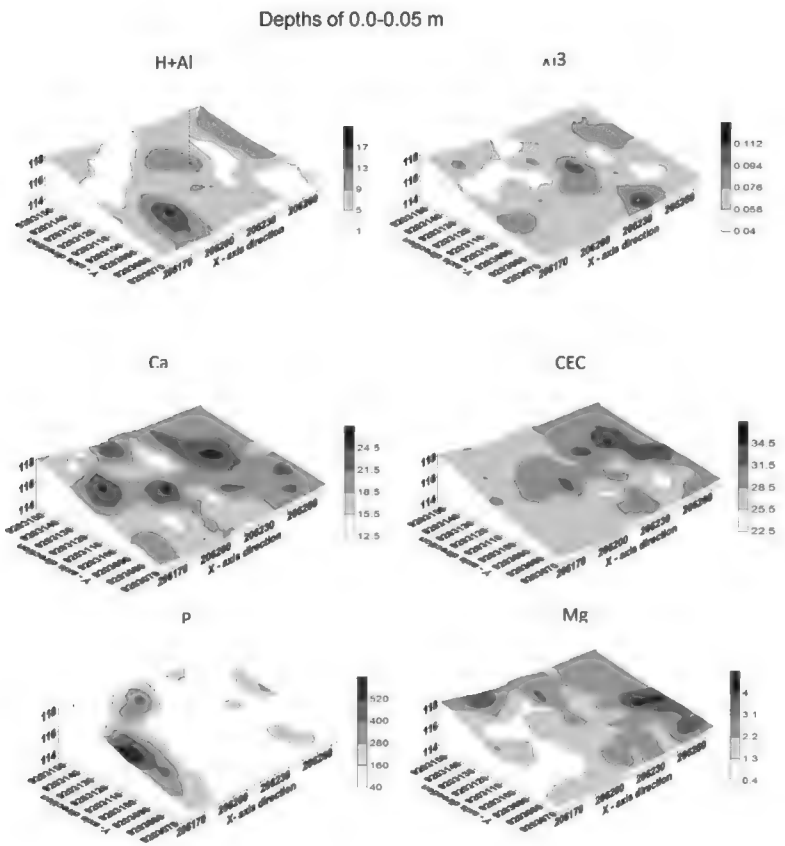
## Kriging maps of soil chemical attributes

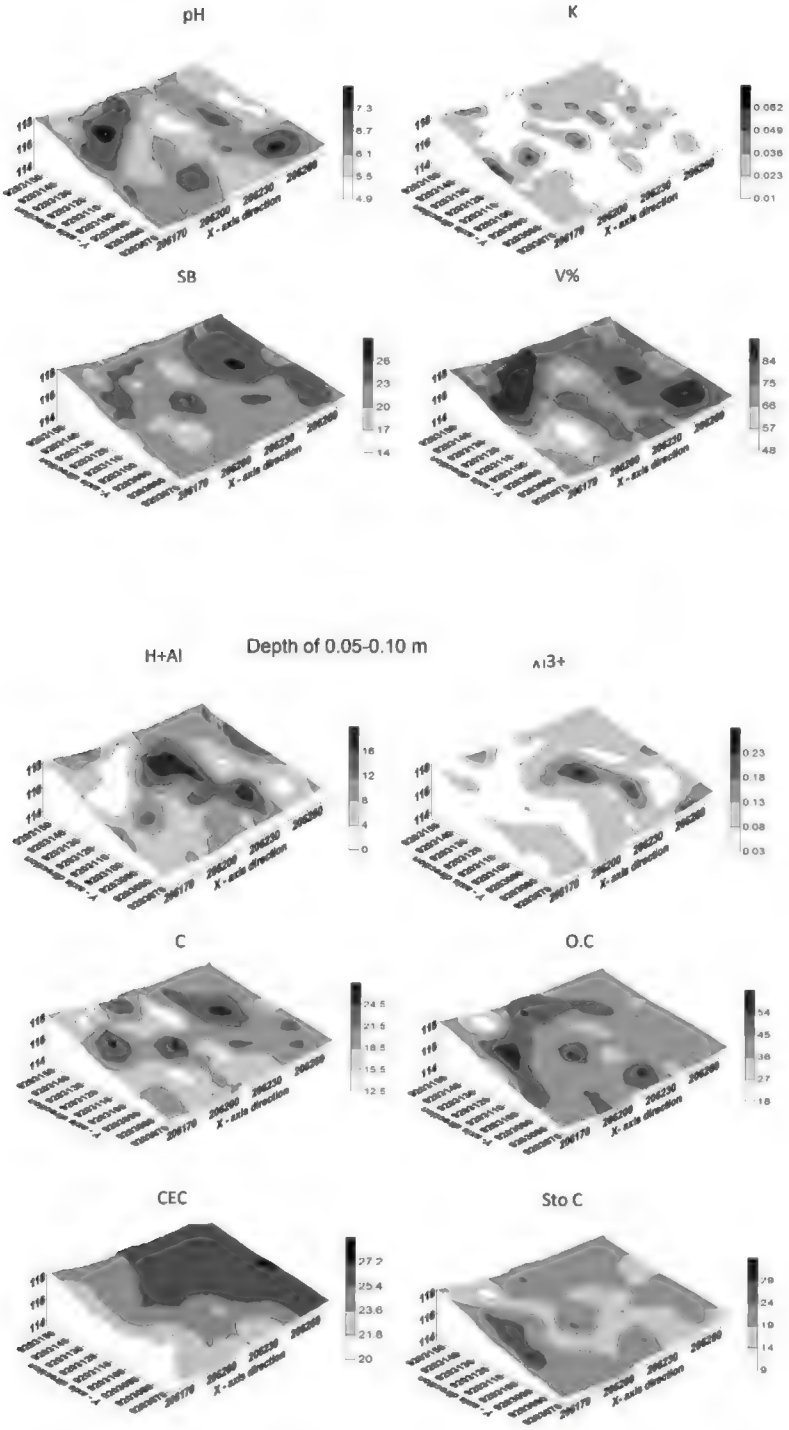
From the semivariogram adjustments, the kriging maps were constructed (Figure 2). Maps are fundamental parts of precision agriculture, since they are subsequently geoprocessed, in order to assist in the correct use and management of the soil.

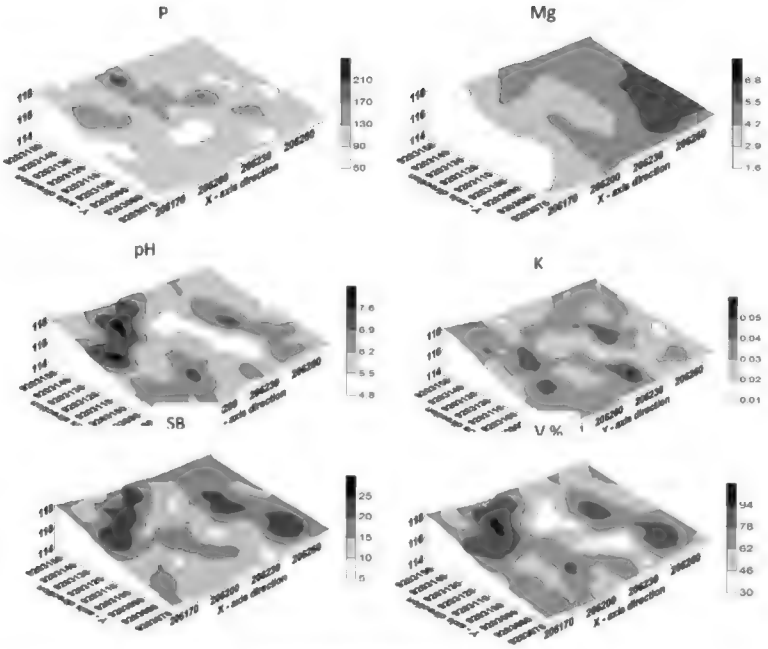
Kriging is the interpolated surface of each variable, which shows the spatial distribution. Through kriging, it is possible to identify the location and coverage of extreme values, the degree of homogeneity of the area and the directions of larger gradients (GUIMARÃES et al., 2016). The use of sampling optimization maps provides information that allows you to

better understand the spatial distribution pattern and define management zones. These maps can be very useful in experimental planning and as a tool for precision agriculture programs (MONTANARI et al., 2005). The spatial distribution maps of the studied variables should be presented in five regular intervals of specific values for each variable, allowing a greater understanding of the distribution, especially those with small intervals between maximum and minimum values.

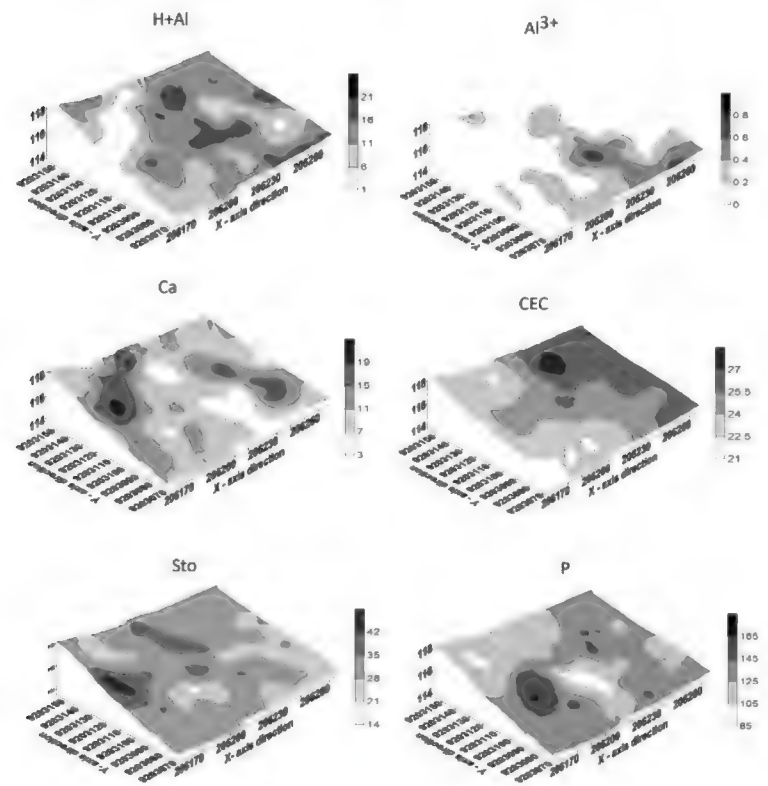
Particularly from the maps generated for the chemical attributes, one can identify that the spatial distribution pattern is quite variable throughout the study area, because for all variables that presented spatial dependence structure, the distribution spots are heterogeneous, thus characterizing sufficient information that Archeological Dark Earths exhibit spatial heterogeneity in their distribution.




pH
K
SB
V%
Depth of 0.05-0.10 m
H+Al
Al3+
C
O.C
CEC
Sto C
X-axis direction




Depth of 0.10-0.20 m



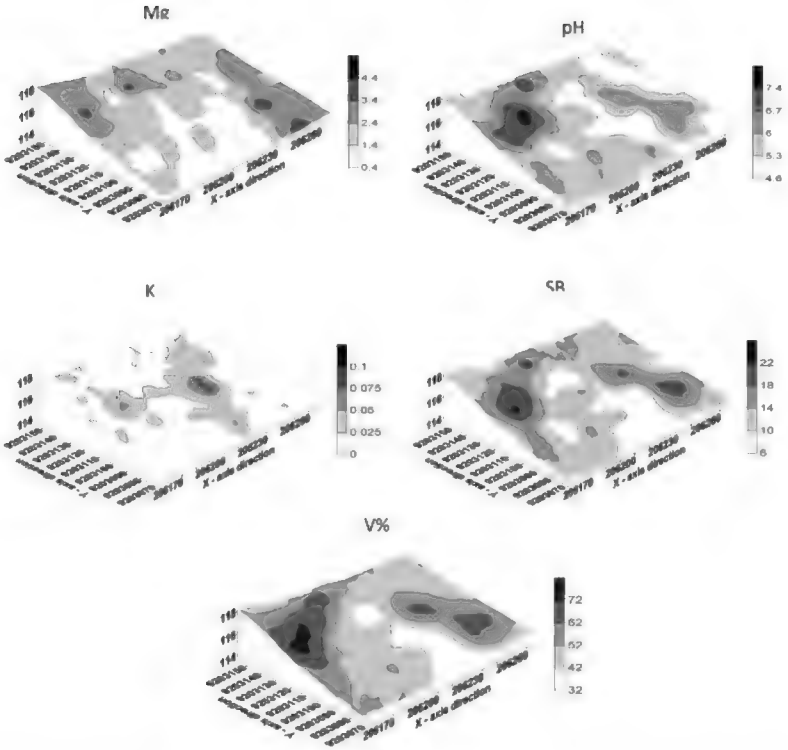



Figure 2. Kriging maps of chemical attributes in Archeological Dark Earths under Cacao cultivation in Western Amazonia.

## 4 I CONCLUSIONS

Geostatistics provided adequate information to understand the spatial distribution of chemical attributes in the Cocoa area. The spherical and exponential model was adjusted for the variables that presented spatial dependence structure. The spatial distribution of chemical attributes in the area showed a strong and moderate degree of spatial dependence.

In the depth (0.0-0.05 m), all variables studied had a strong spatial dependence, except for Sto C and TOC that did not present spatial dependence. Moderate spatial dependence was observed at depths (0.05-0.10 m) for Ca and Mg, CEC and at depth (0.10-0.20 m) for P, CEC and V%.

The kriging technique proved to be an important tool in understanding the dynamics of soil chemical attributes evaluated in this study. The spatial variability of chemical attributes should be taken into account in agricultural planning, this information can be used to optimize fertilizer applications, increasing productivity and reducing costs and environmental problems.

## REFERENCES


ALHO, L. C.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, D. M. P.; MANTOVANELLI, B. C.; SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e estoque de carbono em Cambissolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia. v. 44, n. 3, p. 246-254, 2014.

AMADO, T. J. C.; PES, L. Z.; LEMAINSKI, C. L.; SCHENATO, R. B. Atributos químicos e físicos de Latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 33, n. 4, p. 831-843, 2009.

AZEVEDO, E. C. Uso da Geoestatística **e de recursos de geoprocessamento no diagnóstico da degradação de um solo argiloso sob pastagem no estado de Mato Grosso**. 2004. Tese (Doutorado) Faculdade de Engenharia Agrícola Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa. **Soil Science Society of American Journal**, Madison. v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; FREITAS, E. V. Dependência espacial de atributos químicos em área cultivada com cana-de-açúcar em Pereira Barreto, SP. **Ciência Agronômica**, Fortaleza. v. 38, n. 4, p. 350-359, 2007.

CAMPOS, M. C. C.; SANTOS, L. A. C.; SILVA, D. M. P.; MANTOVANELLI, B. C.; SOARES, M. D. R. Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de 314 solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. **Agro@mbiente On-line**, Boa Vista. v. 6, n. 2, p. 102-109, 2012. Doi: 10.18227/1982-8470ragro.v6i2.682

CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; CANELAS, L. P.; NOVOTNY, E. H.; MOUTTA, R. O.; TROMPOWSKY, P.; SANTOS, G. A. Fracionamento químico da matéria orgânica e características de ácidos húmicos de solos com horizonte A antrópico da Amazônia (Terra Preta). Acta Amazônica, Manaus. v. 37, n. 1, p. 91-98, 2007.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob Sistema Plantio Direto. **Ciência Agronômica**, Fortaleza. v. 43, n. 3 p. 453-461, 2012.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2011. 230p. (Documento 132).

FALCÃO, N. P. S.; BORGES, L. F. Efeito da fertilidade de terra preta de índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão hawaí (Carica papaya L.). Acta Amazônica, Manaus. v. 36, n. 4, p. 401-406, 2006.

FRASER, J. A, CLEMENT, C. R. Dark earths and manioc cultivation in Central Amazonia: A window on pre-Columbian agricultural systems?. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas, Belem. V. 3, n. 2, p. 175-194, 2008.

GERMAN, L. A. Historical contingencies in the coevolution of environment and livelihood: contributions to the debate on Amazonian Black Earth. Geoderma, Amsterdam. v. 111, n. 3-4, p. 307–331, 2003. Doi: 10.1016/S0016-7061(02)00270-7

GLASER, B.; BALASHOV, E.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. **Organic Geochemistry**, Madison. v. 31, n. 7-8, p. 669-678, 2000.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer for Windows version 8.0**. Colorado: Golden, 2002.

GUIMARÃES, W. D.; GRIPP JUNIOR, J.; MARQUES, E. A. G.; SANTOS, N. T.; FERNANDES, R. B. A. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos ocupados por pastagens. **Ciência Agronômica**, Fortaleza. v. 47, n. 2, p. 247-255, 2016.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geoestatistics**. New York: Oxford University Press, p. 561, 1989.

KERN, D. C.; KÄMPF, N. Antigos assentamentos indígenas na formação de solos com Terra Preta Arqueológica na região de Oriximiná, Pará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 13, p. 219-225.1989.

KERN, D. C.; KÄMPF, N. **Ação antrópica e pedogênese em solos com Terra Preta em Cachoeira-Porteira,** Belém. Museu Paraense Emílio Goeldi. v. 1, p. 187-201, 2005.

LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; SILVA, S. A. Distribuição espacial da matéria orgânica, grau de floculação e argila dispersa em água em área de vegetação natural em regeneração e pastagem. **Revista Árvore**, Viçosa. v. 37, n. 3, p. 539-546, 2013.

MANTOVANELLI, B. C.; CAMPOS, M. C. C.; ALHO, L. C.; FRANCISCON, U.; NASCIMENTO, M. F.; SANTOS, L. A. C. Distribuição espacial dos componentes de acidez do solo em área de campo natural na região de Humaitá, Amazonas. **Revista de Ciências Agroambientais**, Rio Verde. v. 14, n. 1, p. 1-9, 2016. Doi:

MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T.; BARBIERE, D. M. Variabilidade espacial de matéria orgânica, P, K e CTC de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar por longo período. **Revista de Biologia e Ciência da Terra**, Paraíba. v. 8, n. 1, p. 153-152, 2008.

MINITAB RELEASE 14.1. **Statistical Software**. US/Canada, 2000.

MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasilia. V. 40, n.1, p. 69-77, 2005.

NOGUEIRA, M. C. S. **Experimentação agronômica I**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2007. 463p.

NOVOTNY, E. H.; AZEVEDO, E. R.; BONAGAMBA, T. J.; CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; HAYES, M. H. B. Studies of the compositions of humic acids from Amazonian dark earth soils. **Enviromental Science Technology**, Madison. v. 41, n. 2, p. 400-405, 2007.

OLIVEIRA, I. A.; MARQUES JUNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; FREITAS, L.; SIQUEIRA, D. S.; CUNHA, J. M. Variabilidade Espacial e Densidade Amostral da suscetibilidade Magnética e dos Atributos de Argissolos da Região de Manicoré, AM. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa. v. 39, n. 3, p. 668-681, 2015.

PESSOA JUNIOR, E. S.; SOUZA, W. B.; SOUZA, K. S.; PIO, M. C. S.; SANTANA, G. P. Terra Preta de Índio na Região Amazônica. **Scientia Amazônica**, Manaus. v.1, n. 1, p. 1-8, 2012.

ROZANE, D. E.; CENTURION, J. F.; ROMUALDO, L. M.; TANIGUCHI, C. A. K.; TRABUCO, M.; ALVES, A. U. Estoque de carbono e estabilidade de agregados de um Latossolo vermelho distrófico, sob diferentes manejos. **Bioscience Journal**, Uberlândia. v. 26, n. 1, p. 24-32, 2010.

SANCHEZ, R. B.; MARQUES, J. R. J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T.; MARTINS FILHO, M. V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia**, Campinas. v. 68, n. 4, p. 1095- 1103, 2009.

SANTOS, L. A. C.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; BERGAMIN, A. C.; SILVA, D. M. P.; MARQUES JUNIOR, J.; FRANÇA, A. B. C. Caracterização de terras pretas arqueológicas no sul do estado do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 37, n. 4, p. 1:12, 2013.

SILVA NETO, S. P.; SANTOS, A. C.; LEITE, R. L. L.; DIM, V. P.; NEVES NETO, D. N.; SILVA, J. E. C. Variação espacial do teor de matéria orgânica do solo e produção de gramínea em pastagens de capim-marandu. **Bioscience Journal**, Uberlandia. v. 28, Supl. 1, p. 41-53, 2012.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, Amsterdam. v. 155, n. 2, p. 55-66, 2010. Doi: 10.1016/j.geoderma.2009.11.024

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 11, ed. Washington: United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. 2010. 338p.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MOREIRA, L. F. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. Ciência Rural, Santa Maria. v. 34, n. 6, p. 1763-1771, 2004.

VIANA, S. F.; CAMPOS, M. C. C.; CUNHA, J. M.; NASCIMENTO, W. B.; MENDONÇA JÚNIOR, A. F. Variabilidade espacial dos atributos químicos em terra preta de índio cultivada na região de Novo Aripuanã, AM. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal. v. 11, n. 3, p. 53-58, 2016.

VIEIRA, S. R.; DECHEN, S. C. F.; SIQUEIRA, G. M.; DUFRANC, G. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos relacionados com o estado de agregação de dois Latossolos cultivados no sistema de semeadura direta. **Bragantia**, Campinas. v. 70, n. 1, p. 185-195, 2011.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, T. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, California. v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel D. (Ed.). **Applications of soil physics**. p. 319-344, 1980.

WELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. **Soil Science Society of American Journal**, Madison. v. 58, n. 1, p. 175-180, 1994.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Soil Science Plant Analysis**, Madison. v. 19, n. 3, p. 1467-1476, 1988.

ZANÃO JÚNIOR, L. A.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial do pH, teores de matéria orgânica e micronutrientes em profundidade em um Latossolo Vermelho sob semeadura direta. **Ciência Rural**, Santa Maria. v. 37, n. 4, p. 1000-1007, 2007.

# CAPÍTULO 15

# VARIABILITY AND SPATIAL CORRELATION OF AGGREGATES AND ORGANIC CARBON IN INDIAN DARK EARTH IN APUÍ REGION, AM

*Data de aceite: 18/05/2021*
*Data de submissão: 11/05/2021*

**Ludmila de Freitas**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
http://lattes.cnpq.br/4626093642810984

**Romário Pimenta Gomes**
Universidade Estadual Paulista
Jaboticabal – São Paulo
https://orcid.org/0000-0003-0663-0962

**Milton César Costa Campos**
Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal da Paraíba
Areia - Paraíba
https://orcid.org/0000-0002-8183-7069

**Wildson Benedito Mendes Brito**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
https://orcid.org/0000-0002-4267-5992

**José Maurício da Cunha**
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - Universidade Federal do Amazonas
Humaitá – Amazonas
https://orcid.org/0000-0003-4057-1708

**Laércio Santos Silva**
Universidade Estadual Paulista
Jaboticabal – São Paulo
https://orcid.org/0000-0002-0805-1318

**Ivanildo Amorim Oliveira**
Instituto Federal de Rondônia
Ariquemes – Rondônia
https://orcid.org/0000-0003-2299-3229

**ABSTRACT:** Having in mind the importance of knowing the variability and spatial correlation of soil properties in Indian Dark Earth (IDE), we evaluated in this study the variability and the spatial correlation of aggregates and carbon in an Ultisol under coffee cultivation in southern Amazonas. It was established a 48 x 88 m sampling grid spaced 06 x 08 m, totalling 88 sampling points. Then soil samples were collected at: 0.0-0.05, 0.05-0.10, and 0.10-0.20 m layers. The spatial variability of the Mean Weighted Diameter (MWD) attributes, aggregates > 2 mm, < 2 mm, bulk density (BD) and organic carbon (OC) was analyzed by adjusting the simple semivariograms, while spatial correlations of the OC with aggregates and BD were analyzed by cross-semivariogram. We could conclude that there was spatial dependence in the variables, wherein the largest ones were observed at 0.0-0.05 m, except for Mean Weighted Diameter (MWD) and aggregates greater than 2.00 mm with larger range of values in depth from 0.05-0.10 and 0.10-0.20 m. The mean weight diameter and aggregate class attributes greater than 2.00 mm had negative spatial correlation with organic carbon at 0.0-0.05 m, while the smaller aggregates than 2.00 mm classes and bulk density correlated positively with organic carbon at 0.0-0.05 m and 0.10-0.20 m.

**KEYWORDS:** Soil aggregation, Geostatistics, Cross variogram.

## VARIABILIDADE E CORRELAÇÃO ESPACIAL DE AGREGADOS E CARBONO ORGÂNICO EM TERRA PRETA DE ÍNDIO NA REGIÃO DO APUÍ, AM

**RESUMO:** Considerando a importância do conhecimento da variabilidade e correlação espacial dos atributos do solo em Terra Preta de Índio (TPIs), avaliou-se neste trabalho a variabilidade e a correlação espacial de agregados e carbono em um Argissolo Amarelo eutrófico sob cultivo de café na região sul do Amazonas. Foi estabelecido um grid amostral com dimensões de 48 x 88 m e espaçamentos de 06 x 08 m, totalizando 88 pontos amostrais. Em seguida, foram coletadas amostras de solos nas profundidades: 0,0-0,05, 0,05-0,10, e 0,10-0,20 m. A variabilidade espacial dos atributos diâmetro médio ponderado (DMP), agregados > 2 mm, < 2 mm, densidade do solo (Ds) e carbono orgânico (CO) foi analisada ajustando os semivariogramas simples, enquanto as correlações espaciais do CO com agregados e Ds foram analisadas por semivariogramas cruzados. Concluiu-se que as variáveis apresentaram dependência espacial, e os maiores alcances são constatados na profundidade 0,0-0,05 m, exceto para DMP e agregados maiores que 2,00 mm com maiores valores de alcance na profundidade 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. Os atributos diâmetro médio ponderado e classes de agregados maior que 2,00 mm apresentam correlação espacial negativa com carbono orgânico na profundidade 0,0-0,05 m, enquanto a classes de agregados menor que 2,00 mm e densidade do solo apresentam correlação positiva com carbono orgânico nas profundidades 0,0-0,05 m e 0,10-0,20 m.

**PALAVRAS-CHAVE:** Agregação do solo, geoestatística, Varioagrama cruzado.

## 1 I INTRODUCTION

The spatial variability attributes of the soil system occurs naturally and in different levels. It can be due to the intrinsic pedogenic factors and processes of soil formation and its interactions with the landscape, as well associated to the management (MARQUES JÚNIOR et al., 2008). However, the human activities to Indian Dark Earth formation have consequences, like a possible spatial variability of the soil properties, being able to modify the soil attributes with its management and, by using it, degradation can occur.

Being aware of it, the use of geostatistic techniques have being employed in the last years, aiming quantify the existence of spatial variations in the several physical attributes, allowing a detailed description of these properties through space (CAMPINAS et al., 2013). When we know the spatial dependence of the soil attributes, we can evaluate the spatial correlation between the attributes by a cross semivariogram (CAMARGO et al., 2008), as shown in the Schaffrath et al. (2008) studies related to the soil physical attributes and Camargo et al. (2008) with the mineralogy and soil aggregates.

The Amazonas is the biggest state of Brazil. It is rich geologically and geomorphologically, consequently in its landscapes, reflecting in diversity in the regional flora. However, the surveys done in the Amazonian region are mostly generic, where detailed

information is always missing (OLIVEIRA et al., 2015), being necessary the dissemination by geostatistic, an easier tool which needs less labor time and allows a better mathematic accuracy estimative values among the georeferenced points.

In this sense, papers (OLIVEIRA et al., 2013, AQUINO et al., 2014, Alho et al., 2014, SOARES et al., 2015) have shown data evaluating the spatial dependence structure in grassland and forest environments. Aquino et al. (2015) in five different areas in south of Amazonas and Silva et al. (2016) evaluating the geometric mean diameter (GMD) and organic carbon (OC) in a cultivated land under IDE in the Apuí region, AM, both had a spatial continuity to most of analyzed attributes, remembering that this tool improving can help in a better understanding and interpretation of this region soil attributes spatial variability.

The study of variability associated to the soil attributes spatial correlation, as OC and its relations with other physical attributes in anthropogenic environments with a so-intimate character like the IDEs, is unprecedented in the Amazonian region. Based on we presented before, in this work we evaluated the variability and spatial correlation of organic carbon, soil density, as well aggregates classes in area of Indian Dark Earth in Apuí, southern of Amazonas.

## 2 | MATERIAL AND METHODS

The evaluated area is situated in the southern of Amazonas state, bordering the Transamazonic Road BR 230, in Apuí. This area is in an Indian Dark Earth, with coffee plants, at 7° 12' 05" south latitude and 59° 39' 35" west longitude. The soil has being used as agricultural land for six years (two years of grass and four years of coffee). Its classification is Eutrophic Yellow Argisol according to Embrapa (2013). This soil is equivalent to the Ultisol (Soil Survey Staff, 2014).

The geology is composed by sandstone of Beneficent formation, recovered by a clay pack of tertiary. In it is prevailed the primary vegetation formed by Dense Tropical Forest, with densified trees. The weather in the region is classified (Köppen classification) as rainy tropical, with a short dry period (Am). The temperatures vary from 25 °C to 27 °C and the pluvial precipitations vary from 2.250 to 2.750 mm annually, where the rains are concentrated from October to June (Brazil, 1978).

In this area we established a sample grid of 48 x 88 m with spacing of 6 x 8 m, totalizing 88 sampling points. After this, we opened small trenches, where we collected the soil samples at the lays of 0.0-0.05, 0.05-0.10, and 0.10-0.20 m at the crossing points, totalizing 264 soil samples. These points were georeferenced using the GPSMAP 76CS (Garmin International, USA).

The texture analysis was done using a solution of 0.1 mol $L^{-1}$ NaOH as chemical dispersant and mechanical stirring at high speed for 15 min. The clay fraction was determined by the pipette method, the sand by sieving and silt was calculated by the difference (Embrapa,

1997). The soil density (BD) was determined in samples with preserved structure, in a volumetric cylinder (5.57 cm diameter and 4.1 cm high) and then dried at 105-110 °C in an oven during 48 hours (Embrapa, 1997). Organic carbon (OC) was determined following the Yeomans & Bremner (1988) recommendations.

Soil samples were removed in blocks, which were air dried and passed through 9.52 mm and 4.76 mm sieves. Then, 20 g samples of the retained aggregates in the 4.76 mm sieve were used in the wet aggregate stability analysis and subjected to vertical oscillations for 15 minutes (Kemper & Chepil, 1965). Results were expressed as Mean Weighted Diameter (MWD), percentage of aggregates greater than 2 mm (% > 2 mm) and percentage of aggregates smaller than 2 mm (% < 2 mm).

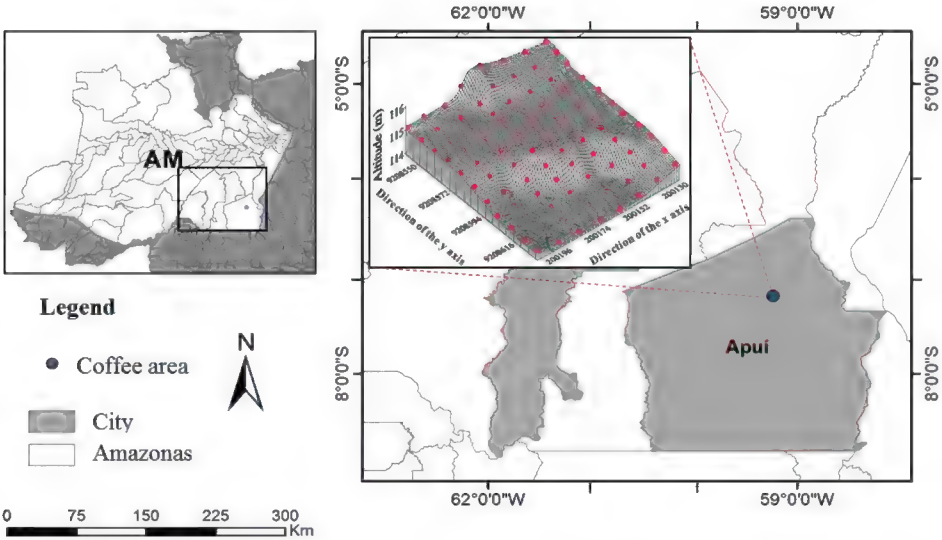



Figure 1. Localization map and sampling grid digital elevation model in Indian Dark Earth under coffee growth in Apuí, AM.

The descriptive statistic was applied using the Minitab Release 14.1 (2000) software to analyze mean, median and coefficient of variation, asymmetry and kurtosis values. The normality of the data was examined by the Kolmogorov-Smirnov test.

The spatial variability of all variables of this study was evaluated through geostatistics. The experimental semivariogram was estimated under the hypothesis of stationarity, by the equation (1):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \qquad (1)$$

where: γ (h) - the semivariance value in a distance h; N (h) - number of pairs involved in the semivariance calculation; Z ($x_i$) - value of attribute Z in position $x_i$; Z ($x_i$ + h) - value of

attribute Z separated by a distance h from position $x_i$.

Permissible mathematical models were adjusted to the semivariograms and estimated experimental semivariograms estimating the following effects: nugget (C0), threshold (C0 + C1), and reach (A). They were based on the pairs involved in the calculation of each point of the experimental semivariogram, based on the sum of the squared residuals (SQR), the estimation of the landing and the coefficient of determination ($R^2$). Then, the cross-validation (CV) technique was applied to test all the models adjustment procedures. In order to analyze the spatial correlation between OC and the other evaluated attributes, cross semivariograms were developed. The estimation of the distribution of variable values for the unsampled points in the grid was performed by kriging using the Surfer program (Surfer for Windows, 1999).

## 3 I RESULTS AND DISCUSSION

The results referring to the descriptive statistical analysis showed that a large part of the studied variables adjusted to the normality, depending on the depth (Table 1). The proximity of the mean and median values indicates a symmetrical distribution of the data (CAJAZEIRA & ASSIS JÚNIOR, 2011), which can be confirmed by the asymmetry and kurtosis coefficients, with values close to zero. According to the Kolmogorov-Smirnov test, only the MWD showed normal distribution at all depths. Except for BD at 0.10-0.20 m, the other attributes adjusted to the normal distribution.

Assuming the classification criteria for the coefficient of variation (CV) proposed by Warrick & Nielsen (1980), the only attribute with high variability in all depths was the class of aggregates < 2.00 mm, while the OC showed high variability in the depths 0.0-0.05 and 0.05-0.10 m and average depth 0.10-0.20 m, corroborating with Corado Neto et al. (2015) results. For MWD, aggregates > 2.00 mm and BD showed low values of CV, except for BD in depth 0.10-0.20 m, with mean CV value. Similar behavior was verified by Aquino et al. (2014) and Alho et al. (2014) in the southern region of Amazonas. Despite the high CV value observed in this study, we can observe that in 53% of the studied attributes a low variability is predominant, indicating an environment with low heterogeneity.

| Descriptive Statistics | Depth. (m) | Average | Median | Coefficients | | | d[1] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Variation (%) | Asymmetry | Kurtosis | |
| MWD (mm) | 0.0 – 0.05 | 3.04 | 3.14 | 3.18 | -0.29 | -0.24 | 0.20* |
| | 0.05 – 0.10 | 3.02 | 3.10 | 3.18 | -0.32 | -0.59 | 0.20* |
| | 0.10 – 0.20 | 2.90 | 2.91 | 4.82 | -0.32 | -0.44 | 0.20* |
| > 2 mm (%) | 0.0 – 0.05 | 90.60 | 91.26 | 4.95 | -0.28 | -0.45 | 0.08* |
| | 0.05 – 0.10 | 88.59 | 86.95 | 8.37 | -0.47 | -0.50 | 0.02 |
| | 0.10 – 0.20 | 81.58 | 81.99 | 8.05 | -0.37 | -0.40 | 0.20* |
| < 2 mm (%) | 0.0 – 0.05 | 7.65 | 6.65 | 53.04 | 0.55 | -0.30 | 0.01 |
| | 0.05 – 0.10 | 14.40 | 13.04 | 49.79 | 0.76 | -0.08 | 0.02 |
| | 0.10 – 0.20 | 13.83 | 12.95 | 50.25 | 0.62 | -0.12 | 0.20* |
| BD (kg $dm^{-3}$) | 0.0 – 0.05 | 1.80 | 1.09 | 9.25 | 0.23 | 0.22 | 0.20* |
| | 0.05 – 0.10 | 1.16 | 1.18 | 9.25 | -0.20 | -0.26 | 0.20* |
| | 0.10 – 0.20 | 2.22 | 2.20 | 12.62 | 0.51 | 1.01 | 0.001 |
| OC (g $kg^{-1}$) | 0.0 – 0.05 | 38.96 | 37.25 | 29.85 | 0.38 | -0.85 | 0.03 |
| | 0.05 – 0.10 | 34.96 | 37.79 | 29.85 | -0.33 | -0.67 | 0.001 |
| | 0.10 – 0.20 | 31.66 | 32.35 | 17.37 | -0.72 | 0.24 | 0.20* |

[1]d: Kolmogorov-Smirnov normality test, * significant at 5% of probability.

Table 1. Weighted Average Diameter (MWD) descriptive statistics, aggregate class greater than 2 mm (> 2 mm), aggregate class smaller than 2 mm (<2 mm), soil density (BD) and organic carbon (OC) in IDE area with coffee growth in Apuí, AM.

Although the CV allows comparing the variability between variables among different units, this information has gained repercussion in the scientific scope. Some authors suggest that the use of CV should not be generalized, since this coefficient does not allow evaluate neither the spatial variability of soil attributes, nor its spatial pattern (SIQUEIRA et al., 2010). In this aspect, the geostatistics is the most suitable tool to characterize the distribution of one or more (regionalized) variables with a spatial-dependent structure (CARVALHO et al., 2011, AQUINO et al., 2014).

The semivariogram estimates are showed in the Figure 2. The predominant model which better adjusts the MWD attributes of experimental semivariograms and aggregates (> 2.00 mm and < 2.00 mm) in all depths was the exponential one. The spherical model better adjusted to BD at 0.0-0.5 m and 0.5-0.10 m depths. Yet, at 0.10-0.20 m depth, it was adjusted to the exponential model. For OC, the adjusted model was the exponential one at 0.0-0.05 m depth and the spherical one at 0.05-0.10 and 0.10-0.20 m. These results agree with the ones belonged to Souza et al. (2009) and Corado Neto et al. (2015). This behavior evidences variation in the geospatialization of variables, abruptly for both MWD and classes

of aggregates. In contrast, BD and OC presented soft (spherical) to abrupt (exponential) changes depending on the depth.

When we analyze the relation between the nugget effect ($C_0$) and the threshold ($C_0 + C_1$) (Figure 2), which reports the degree of spatial dependence (DSD), according to the classification proposed by Cambardella et al. (1994), we evidence that the attributes MWD and aggregates > 2.00 mm presented strong spatial dependence at all depths [$C_0/(C_0+C_1) \leq 25$ %]. The BD at 0.0-0.05 m depth was characterized as moderate spatial dependence [$C_0/(C_0+C_1)$ between 25 e 75%] and strong at 0.05-0.10 and 0.10 -0.20 m depths.

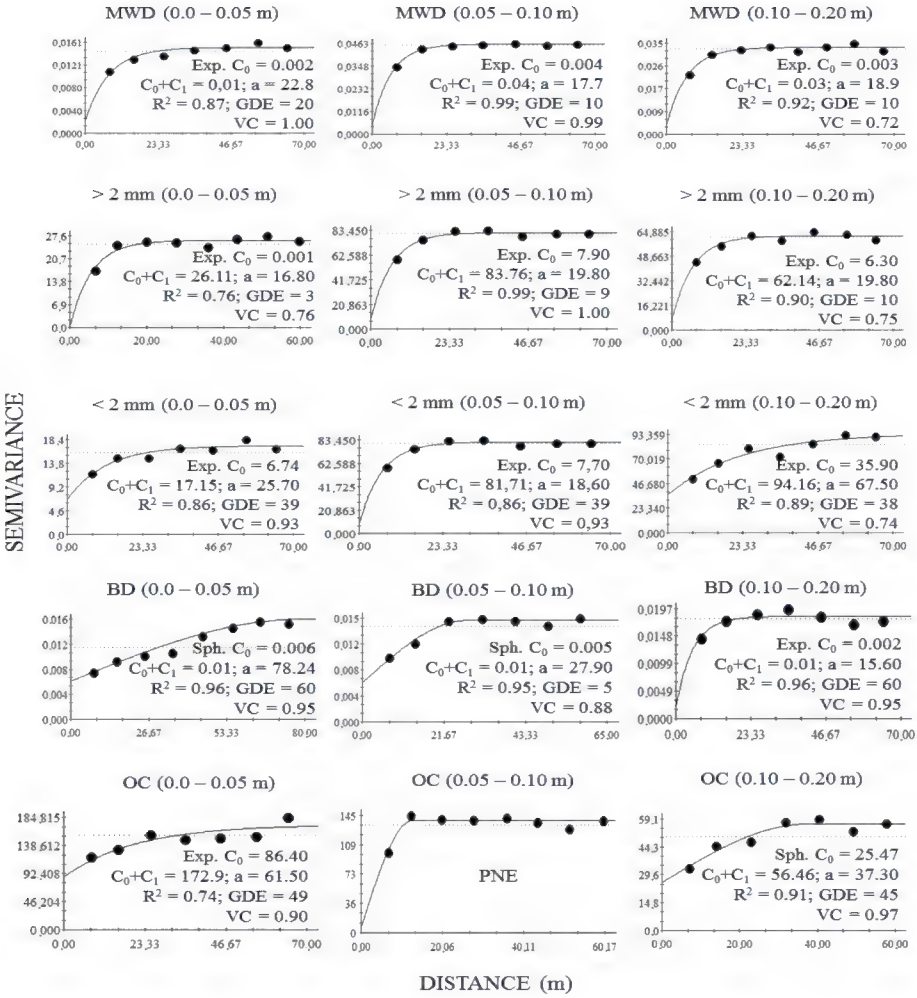



Figure 2. Semivariograms of the weighted mean diameter (MWD, mm), aggregate class greater than 2 mm (> 2 mm), aggregate class smaller than 2 mm (<2 mm), soil density (BD, kg $dm^{-3}$) and organic carbon (OC, g $kg^{-1}$) in three layers in IDE area in Apuí, AM. The acronyms correspond respectively to the model (Exp = Exponential, Sph = Spherical), pure nugget effect = PNE, nugget effect = C0, Landing = C0 + C1 and the reach (m) = a, $R^2$ = coefficient of determination; DSD% = degree of spatial dependence and CV = cross-validation.

The OC followed this same behavior. Carvalho et al. (2003) reinforce that the moderate spatial dependence is attributed to factors extrinsic to the soil, such as the adopted management, while Cambardella et al. (1994) attribute the strong spatial dependence to the intrinsic soil characteristics controlled by natural conditions, such as pedogenetic processes, mineralogical characteristics and landscape.

The extent of spatial dependence (Figure 2) represents an important parameter of the geostatistics in the interpretation of semivariograms, because its determines the limit distance in which a regionalized variable presents continuity in space, that is, so far the sampled points correlate with each other (MATIAS et al., 2013). Thereafter, the lower the reach, the greater the spatial variability of the attributes (MARQUES JÚNIOR et al., 2008). In this sense, the attributes studied presented different reach values, varying from 12.60 to 78.34 m, and all values above the established one in the sample mesh, indicate greater spatial continuity of soil properties.

We observed influence in the reach values as a function of depth. Among the variables studied, the BD assumed the extreme reach positions, with a greater reach (78.24 m) at 0.05-0.10 m and the smaller reach (15.60 m) at 0.10-0.20 m. This disparity is attributed to the management, which tends to standardize the superficial layer of the soil, mainly reflecting the BD, considered the physical attribute sensitive to the variations of the management to which the soil is submitted (MOTA et al., 2013). We can observe that MWD and aggregates > 2.00 mm have more homogeneous reach values for all depths when compared to the other variables. In addition, the continuity in the spatial distribution for MWD was greater at 0.0-0.05 m, while aggregates > 2.00 mm tended to stabilize from 0.05-0.10 m depth.

The OC at 0.0-0.05 m showed pure nugget effect (PNE), which is the absence of spatial dependence, once the structural part of spatial dependence is defined with only one point. The possible causes for such behavior can be attributed to the analytical error or undetected variations, based on the sampling distance used in the grid. Therefore, it is necessary to increase the sampling distance to capture the semivariance of this variable (CARVALHO et al., 2011).

In general, the reach values tended to decrease in depth for the attributes MWD, BD, and OC, showing greater spatial variability as it advances in the soil profile, accordingly with the results of Alho et al. (2014). Tavares et al. (2012) evaluating the spatial relationship of physical attributes of a Cohesive Argisol cultivated with sugarcane, found reach values for BD and OC decreasing with depth.

In order to better understand the spatial similarity of the evaluated attributes, cross-linked semivariograms were constructed, setting the OC and correlating spatially with other attributes, at the respective depths in question (Figure 3). The results showed that the spatial continuity of the cross-semivariograms was different among the attributes as a function of depth. We found spatially negative correlations between OC x MWD, and OC x class of aggregates greater than 2.00 mm at 0.0-0.05 m, at the same depth OC x aggregates smaller

than 2.00 mm.

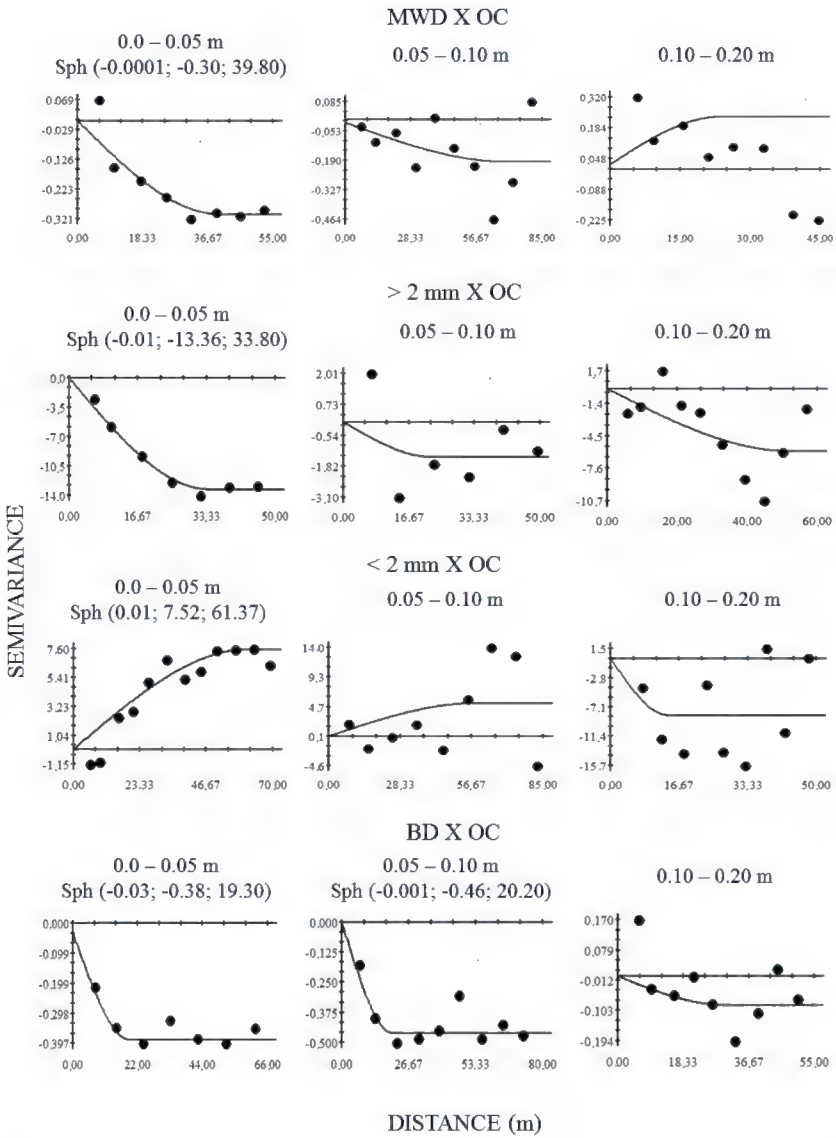



Figure 3. Crossing semivariograms and the mathematical model adjusted in the attributes: the weighted mean diameter (DPM, mm), aggregate class greater than 2 mm (> 2 mm), aggregate class smaller than 2 mm (<2 mm), soil density (BD, kg $dm^{-3}$) and organic carbon (OC, g $kg^{-1}$) in IDE area with coffee plants in Apuí, AM. Spherical model (Sph) and values into the parameters are respectively the nugget effect = C0, landing = C0 + C1 and the reach (m) = a.

Appropriate explanation for this atypical behavior is due to the greater proportion of the silt and sand (40 and 29 fold respectively), to the amount of clay. The physical-

chemical characteristics of the sand fraction, such as, absence of surface load and low specific surface, impart its non-cohesive character (Brady & Weil, 2008), imparing the union between inorganic and organic particles of the soil.

The positive behavior of OC x smaller than 2.00 mm is due to the effectivity of organic matter and clay that, when they associate, they link the smaller particles of soil. On this assertion, Lima & Anderson (1997) attribute this behavior to the mineralogy of the clay fraction, constituted almost solely by oxides and hydroxides of Fe and Al, becomes more affective in the genesis of smaller aggregates, once the oxides are flocculating agents. Passos et al. (2007) state that the smallest aggregates present higher clay content associated with organic matter and this chelation is responsible for the higher stock of organic matter in the soil, that is, a higher stock of OC. In this sense, the cross-semivariogram in fully illustrated this behavior, showing similarity in the spatial dependence structure up to 61.37 m distance at 0.0-0.05 m.

The negative spatial correlation for BD x OC and with the close reach values at depths 0.0-0.05 m (a = 19.30 m) and 0.05-0.10 m (a = 22.20 m) showed that these variables have a similar limit of spatial dependence, that is, they would co-occur simultaneously in space at these distances. This is due to the greater part of the coffee plant root system at 0.30 m depth (GUIMARÃES & LOPES, 1986), as well as the natural and anthropogenic increase of organic carbon in the IDEs. This inverse correlation is already well understood in the literature (VASCONCELOS et al., 2014, ALHO et al., 2014).

The evaluated attributes isoline and surface maps presented a large amplitude of the studied attributes (Figure 4). When analyzed, these maps present clearly that the evaluated soil attributes variability is dependent mainly of depth and landscape variations (Figure 4). We can observe that at 0.0-0.5 m depth, the MWD, aggregates > 2.00 mm, < 2.00 mm, and OC presented higher spatial variability, thanks to the management in the surface and the surface landscape itself allows a higher soil attributes spatial variability (MARQUES JÚNIOR et al., 2008).

On the other hand, at 0.05-0.10 m and 0.10-0.20 m, there was a more defined behavior, with very close values and similarities in the data distribution, because as the soil getting deeper, it follows a more homogeneous pattern, due to the influence almost exclusively of soil formation factors and processes. This more continuous specialization can be verified by the semivariograms higher values reached and the greater distance of the isolines, parameters that prove the smaller spatial variability.

In this aspect, in the compartments with lower OC contents, the lower values of MWD are similar to the larger ones of BD and aggregates < 2.00 mm at 0.5-0.10 and 0.10-0.20 m (Figure 4). Thus, the lower values of MWD are reflections of the higher BD, so the low values of BD are result of the high OC content evidenced in IDE soils, according to Oliveira et al. (2015).

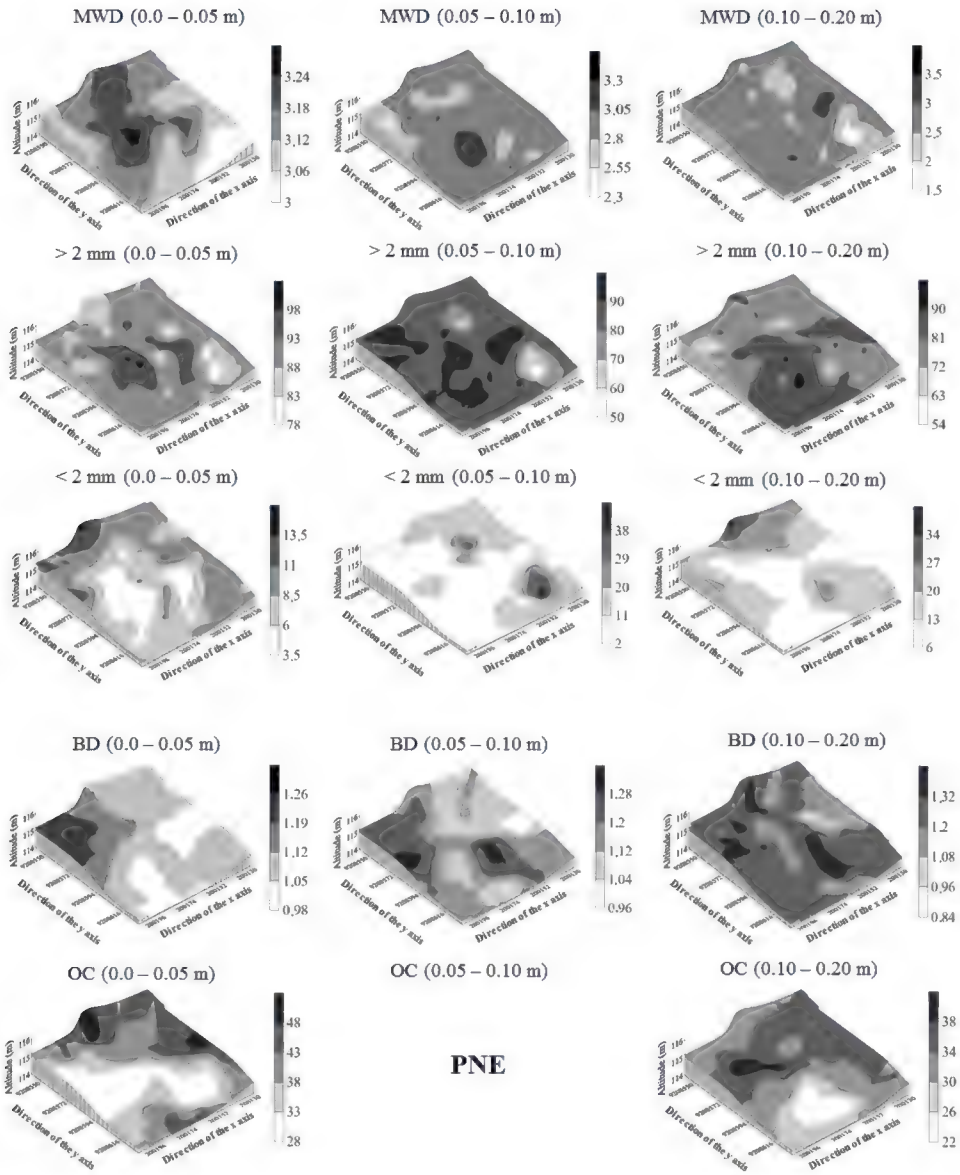



Figure 4. Distribution isolines maps of the weighted mean diameter (MWD, mm), aggregate class greater than 2 mm (> 2 mm), aggregate class smaller than 2 mm (<2 mm), soil density (BD, kg $dm^{-3}$), organic carbon (OC, g $kg^{-1}$) and pure nugget effect = PNE in three layers in IDE area in Apuí, AM.

More recent studies (SOARES et al., 2015) reaffirm an increase in depth of BD in IDE area under pasture in Manicoré, AM, due to the OC shortage as it increases in depth.

In a general way we could found that, regardless of the size of the study area, the small geomorphological variations condition different variability in the soil physical attributes.

## 4 | CONCLUSION

The evaluated variables presented structures of spatial dependence, and the largest reaches are found at 0.0-0.05 m, except for MWD and aggregates larger than 2.00 mm, with greater reach values at 0.05-0.10 and 0.10-0.20 m.

The weighted mean diameter and classes of aggregates greater than 2.00 mm attributes present negative spatial correlation with organic carbon at 0.0-0.05 m, while to classes of aggregates smaller than 2.00 mm and soil density showed a positive correlation with organic carbon at 0.0-0.05 and 0.10-0.20 m.

## REFERENCES


Alho, L.C., Campos, M.C.C., Silva, D.M.P., Mantovanelli, B.C., Souza, Z.M. 2014. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e estoque de carbono em Cambissolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 44(3):246–254.

Aquino, R.E., Campos, M.C.C., Marques Junior, J., Oliveira, I.A., Mantovaneli, B.C., Soares, M.D.R. 2014. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em Latossolo sob floresta nativa e pastagem na Região de Manicoré, Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** 38(2):397–406.

Aquino, R.E., Campos, M.C.C., Marques Junior, J., Oliveira, I.A., Teixeira, D.D.B., Cunha, J.M. 2015. Uso de semivariogramas escalonados no planejamento amostral de atributos físicos do solo em ambientes na região Sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39(1):21–30.

Brady, N.C., Weil, R.R. 2008. **The nature and properties of soils.** 14. ed. Prentice Hall, New Jersey, USA. 992 p.

Brasil. Ministério das Minas e Energia. 1978. **Projeto Radambrasil.** 17. ed. Folha SB. 20, Purus, Rio de Janeiro, Brazil. 566 p.

Camargo, L.A., Marques Júnior, J., Pereira, G.T., Horvat, R.A. 2008. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. I – Mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32(6):2269–2277.

Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Novak, J., Konopka, A.E. 1994. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. **Soil Science Society of America Journal,** 58(5):1501–1511.

Campinas, D.S.N., Farias, P.R.S., Lima, H.V., Oliveira, F.J. 2013. Variabilidade espacial dos atributos físicos de solos em dois sistemas de manejo na Amazônia Oriental. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia,** 24(2):78–87.

Carvalho, L.M., Correia, P.M., Ryel, R.J., Martins-Loução, M.A. 2003. Spatial variability of arbuscular mycorrhizal fungal spores in two natural plant communities. **Plant and Soil,** 251(2):227–236.

Carvalho, L.A., Meurer, I., Silva Júnior, C.A., Cavalieri, K.M.V., Santos, C.F.B. 2011. Dependência espacial dos atributos físicos de três classes de solos cultivados com cana-de-açúcar sob colheita mecanizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** 15(9):940–949.

Cajazeira, J.P., Assis Júnior, R.N. 2011. Variabilidade espacial das frações primárias e agregados de um Argissolo no Estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica,** 42(2):258–267.

Corado Neto, F.C., Sampaio, F.M.T., Veloso, M.E.C., Matias, S.S.R., Andrade, F.R., Lobato, M.G.R. 2015. Variabilidade espacial dos agregados e carbono orgânico total em Neossolo Litólico Eutrófico no município de Gilbués, PI. **Revista de Ciências Agrárias,** 58(1):75–83.

Embrapa. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 1997. **Manual de métodos de análise de solo.** 2. ed. Embrapa, Rio de Janeiro, Brazil. 212 p.

Embrapa. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2013. **Sistema brasileiro de classificação de solo**. 3. ed. Embrapa, Rio de Janeiro, Brazil. 353 p.

Guimarães, P.T.G., Lopes, A.S. 1986. Solos para cafeeiro: características, propriedades e manejo. In: Rena, A.B. (Ed.). 1986. **Cultura do cafeeiro:** fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 116 p.

Kemper, W.D., Chepil, W.S. 1965. Aggregate stability and size distribution. In: Black, C.A. (Ed.). 1965. **Methods of soil analysis**. American Society of Agronomy, Madison, USA. p. 499–510.

Lima, J.M., Anderson, S.J. 1997. Aggregation and aggregate size effects on extractable iron and aluminum in two Hapludox. **Soil Science Society of America Journal,** 61:965–970.

Marques Júnior, J., Souza, Z.M., Pereira, G.T., Barbier, D.M. 2008. Variabilidade espacial de matéria orgânica, P, K e CTC de um Latossolo cultivado. **Revista de Biologia e Ciências da Terra,** 8(1):143–152.

Matias, S.S.R., Marques Júnior, J., Siqueira, D.S., Pereira, G.T. 2013. Modelos de paisagem e susceptibilidade magnética na identificação e caracterização do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** 43(1):93–103.

Minitab Release 14.1. 2000. **Statistical Software**. US/Canadá.

Mota, J.C.A., Freire, A.G., Assis Júnior, R.N. 2013. Qualidade física de um Cambissolo sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo,** 37(5):1196–1206.

Oliveira, I.A. Campos, M.C.C., Soares, M.D.R., Aquino, R.E., Marques Júnior, J., Nascimento, E.P. 2013. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, sob diferentes usos na região Sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciências do Solo,** 37(4):1103–1112.

Oliveira, I.A., Marques Júnior, J., Campos, M.C.C., Aquino, R.E., Freitas, L., Siqueira, D.S., Cunha, J.M. 2015. Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de Argissolos da região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciências do Solo,** 39(3):668–681.

Passos, R.R., Ruiz, H.A., Mendonça, E.S., Cantarutti, R.B., Souza, A.P. 2007. Substâncias húmicas, atividade microbiana e carbono orgânico lábil em agregados de um Latossolo vermelho distrófico sob duas coberturas vegetais. **Revista Brasileira de Ciências do Solo,** 31(5):1119–1129.

Schaffrath, V.R., Tormena, C.A., Fidalski, J., Gonçalves, A.C.A. 2008. Variabilidade e correlação espacial de algumas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distroférrico sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32(4):1411–1417.

Silva, D.M.P., Campos, M.C.C., Franciscon, U., Alho, L.C., Santos, L.A.C., Paula Neto, P., Bergamin, A.C., Souza, Z.M. 2016. Variabilidade espacial das propriedades do solo em sítio de terra preta arqueológica sob cultivo de cacau. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40(e0140816):1–12.

Siqueira, D.S., Marques Júnior, J., Pereira, G.T. 2010. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma,** 155:55–66.

Soares, M.D.R., Campos, M.C.C., Souza, Z.M., Brito, W.B.M., Franciscon, U., Castione, G.A.F. 2015. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob pastagem em Manicoré, AM. **Revista de Ciências Agrárias,** 58(4):434–441.

Soil Survey Staff. 2014. Keys to soil taxonomy. 12. ed. **United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service**, Washington, DC, USA. 372 p.

Souza, Z.M., Marques Júnior, J., Pereira, G.T. 2009. Spatial variability of the physical and mineralogical properties of the soil from the areas with variation in landscape shapes. **Brazilian Archives of Biology and Technology,** 52(2):305–316.

Surfer for Windows. Realese 7.0. 1999. **Contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers.** User's guide. Golden Software, New York, USA. 619 p.

Tavares, U.E., Rolim, M.M., Pedrosa, E.M.R., Montenegro, A.A.A., Magalhães, A.G., Barreto, M.T.L. 2012. Variabilidade espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** 16(11):1206–1214.

Vasconcelos, R.F.B., Souza, E.R.S., Cantalice, J.R.B., Silva, L.S. 2014. Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** 18(4):381–386.

Warrick, A.W., Nielsen, D.R. 1980. Spatial variability of same physical properties of the soil. In: HILL, D. (Ed.). 1980. **Applications of soil physics.** Academic, New York, USA. p. 319–344.

Yeomans, J.C., Bremner, J.M. 1988. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Journal Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 19(13):1467-1476.

# SOBRE OS ORGANIZADORES

**MILTON CÉSAR COSTA CAMPOS -** Graduado em Agronomia pela Universidade Federal da Paraíba (2004), Mestrado em Agronomia (Ciências do Solo) pela Universidade Estadual Paulista (2006), Doutorado em Agronomia (Ciências do Solo) pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (2009) e Pós-Doutorado em Engenharia de Água e Solo pela Universidade Estadual de Campinas (2013). É Professor Associado II do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba. Foi professor do Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente da Universidade Federal do Amazonas (09/2006 a 08/2020); coordenador do Curso de Engenharia Ambiental (2007-2008); diretor do Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente (2010-2014); coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (2015-2019). Atualmente é Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq - Nível 2 - CA AG – Agronomia. Editor Assistente da Revista Brasileira de Ciência do Solo. Coordenador da Comissão de Levantamento e Classificação do Solo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (2019 -2023); Vice-diretor da Divisão I - SOLO NO ESPAÇO E NO TEMPO da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (2019 -2023). Orienta no Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo/UFPB e Ciências Ambientais/UFAM. Tem experiência na área de Agronomia, com ênfase em Ciência do Solo, atuando principalmente nos seguintes temas: Gênese e Morfologia do Solo; Mineralogia do Solo e Relação Solo-Paisagem.

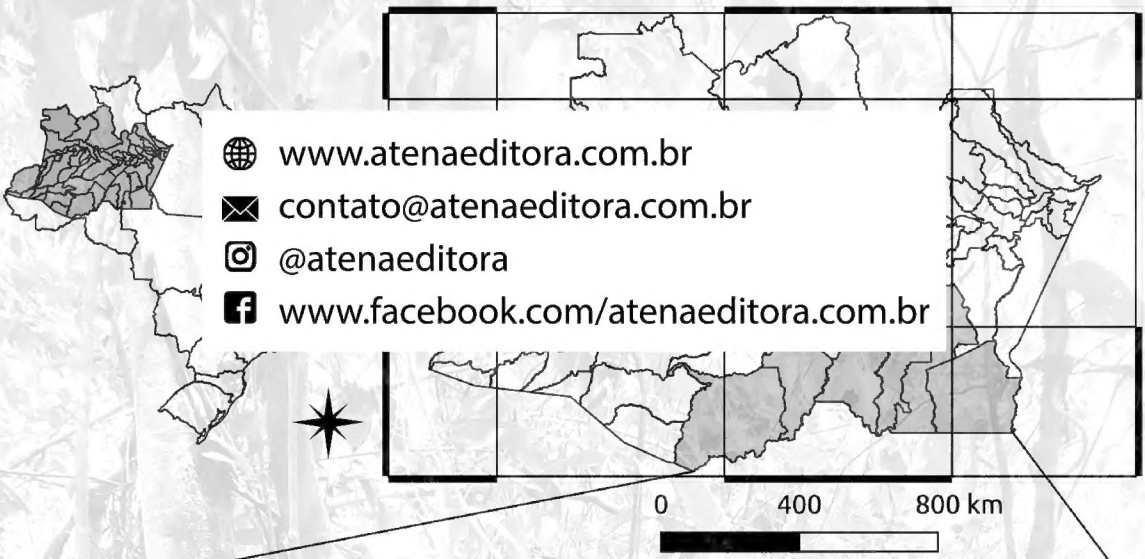
**JOSÉ MAURÍCIO DA CUNHA -** Graduação em Bacharelado em Física pela Universidade Federal do Amazonas (2008), Mestrado em Física pela Universidade Federal do Amazonas (2011) e Doutorado em Física Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso (2016). É Professor Adjunto IV do quadro permanente da Universidade Federal do Amazonas, do Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente (IEAA/ UFAM) e credenciado ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da UFAM, conceito 3 da CAPES. É Líder do Grupo de Pesquisa Solos e Ambiente Amazônico. Está autuando na área de Engenharia Agrícola (com ênfase em Física do Solo e Manejo e Conservação do Solo) e Geociência (com ênfase em Sensoriamento Remoto), nas seguintes áreas de pesquisa: Manejo e Qualidade do solo; Atributos do solo; Análises Espaciais Aplicada a Ciência do Solo; Estimativas de parâmetros ambientais a partir do Sensoriamento Remoto.

**ELILSON GOMES DE BRITO FILHO -** Possui o ensino médio técnico integrado em Agropecuária pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas-IFAM (2013), Foi monitor do laboratório de solos e nutrição de plantas da Universidade Federal do Amazonas - UFAM (2015-2020), Ganhou três menções honrosas de melhor projeto de iniciação científica (PIBIC) em Ciências Agrárias (2018, 2019, 2020), Ganhou Premiação de Melhor Trabalho Oral no IV Simpósio Internacional Argentina- Brasil - Cuba (UFRRJ - 2019), Foi Premiado com 2° melhor trabalho no 9° Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade (9° SIGABI 2020), Foi voluntário em programas de ação e extensão, Foi

monitor das disciplinas de Gênese, morfologia e classificação do solo; Introdução a ciência do solo; Fertilidade do solo e nutrição de planta; Introdução a agronomia; Química Geral; Química Orgânica. Atualmente é graduando em Agronomia pelo Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba (CCA/UFPB), Participante do Grupo de Pesquisa Solos e Paisagens, Bolsista de iniciação científica do CNPq na área de ciências agrárias (Ciência do solo), Membro da Comissão Especializada de Levantamento e Classificação de Solos da Divisão Solos no Espaço e no Tempo - Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (2019-2023), Revisor de revista de periódicos internacionais. Trabalhando área de agronomia com ênfase em ciência do solo, já publicando um total de 20 artigos e 53 resumos em eventos a nível regional, nacional e internacional.

# TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA:

## Atributos morfológicos, físicos, químicos e efluxo de CO2 em solos sob diferentes usos na região Sul do Amazonas




www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Atena Editora
Ano 2021

# TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA:

## Atributos morfológicos, físicos, químicos e efluxo de CO2 em solos sob diferentes usos na região Sul do Amazonas

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Atena Editora
Ano 2021